

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 15  
5 + 2009

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

## ЗМІСТ

*Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки оптико-электронных устройств дистанционного зондирования Земли

*Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Макарова Г. А., Апостолов О. А., Ющенко М. В.* Класифікування земного покриття за супутниковими даними MODIS для моніторингу посівів озимих зернових у межах адміністративних районів Київської та Миколаївської областей України

*Белоброва М. В., Боев А. Г., Кабанов А. В., Матвеев А. Я., Цымбал В. Н.* Оперативное картографирование и диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования

*Котов Д. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф.* Временные вариации ионного состава во внешней ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г.

*Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 1. Результаты спектрального анализа

## CONTENTS

3 *Mikheenko L. A., Borovytsky V. N.* Metrological support of radiometric calibration of opto-electronic instruments for Earth remote sensing

16 *Sakhatsky O. I., Zholobak G. M., Makarova H. A., Apostolov O. A., Yushchenko M. V.* Land cover classification for the monitoring of winter grain crops within the Kyiv oblast and Mykolaiv oblast (Ukraine) with the use of MODIS data

24 *Belobrova M. V., Boyev A. G., Kabanov A. V., Matveyev O. Ya., Tsybmal V. N.* On-line map-making and diagnostics of oil pollutions of the sea surface using multifrequency radar data

34 *Kotov D. V., Pulyayev V. A., Chernogor L. F.* Time variations of ion composition in the topside ionosphere during the 1 August 2008 solar eclipse

43 *Chernogor L. F., Shamota M. A.* Geomagnetic pulsations associated with solar terminators near Kharkiv city. 1. Spectral analysis

<i>Пуляев В. А., Домнин И. Ф., Дзубанов Д. А.</i> Коррекция электронной концентрации ионосферной плазмы при нестабильности константы радиолокатора некогерентного рассеяния	<b>52</b>	<i>Pulyayev V. A., Domnin I. F., Dzubanov D. A.</i> Correction of an estimate for electron concentration of ionospheric plasma at instability of the constant of the incoherent scatter radar
<i>Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д., Соловьев А. А.</i> К вопросу о возможности развития ленгмюровской турбулентности на ранней стадии вспышечного процесса	<b>59</b>	<i>Kryshstal' A. N., Gerasimenko S. V., Voitsehovskaya A. D., Soloviov A. A.</i> On the possibility of Langmuir turbulence development at the early stage of a flare process
<i>Кузьков В. П., Воловик Д. В., Кузьков С. В., Содник З., Пуха С. П.</i> Системы наведения и сопровождения телескопа для лазерных коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником	<b>68</b>	<i>Kuz'kov V. P., Volovyk D. V., Kuz'kov S. V., Sodnik Z., Pukha S. P.</i> Pointing and tracking systems of the telescope for laser communication experiments with a geostationary satellite
<i>Андреев Ф. М., Ковбасюк С. В.</i> Возможности многопозиционного комплекса, созданного на базе национальных РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов	<b>74</b>	<i>Andreev F. M., Kovbasyuk S. V.</i> Possibilities of multiposition complex created on the basis of national early warning radars
<b>НАШИ АВТОРИ</b>	<b>82</b>	<b>OUR AUTHORS</b>
<b>НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ</b>	<b>84</b>	<b>NEWS FROM SPACE AGENCIES</b>

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

---

Підписано до друку 16.11.2009. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс.  
Ум. друк. арк. 8,82. Обл.-вид. арк. 9,26. Тираж 200 прим. Зам. № 2547.

---

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,  
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 528.7: 629.78

**Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий**

Национальный технический университет Украины «Київський політехнічний інститут», Київ

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

---

*Аналізуються методи, схеми і засоби абсолютизації вимірювань енергетичних характеристик і калібрування оптико-електронних приладів дистанційного зондування Землі. Запропоновано нові схеми і методи калібрування вітчизняних космічних систем високого амплітудного і просторового розділення, які гарантують високий метрологічний рівень вимірювань при використанні доступної в Україні еталонної, елементної і приладової бази.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Радиометрическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств (МСУ) космического базирования является важнейшим этапом их предполетной подготовки, от метрологического уровня которой во многом зависит качество информации, получаемой с космического аппарата. Разработкой калибровочных установок и соответствующего метрологического обеспечения занимаются все ведущие космические организации мира [1, 3, 9, 20, 21]. Значительные успехи достигнуты в этом направлении Россией, где в различное время были созданы достаточно совершенные системы «Терек», «Поиск», «Камелия», «Крона», «Спектр» для калибровки бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли «Ресурс», «Фрагмент», «Метер» и др. [21]. Начаты такие работы и в Украине, в частности для предполетной калибровки украинских МСУ типа «Egypťsat» и высокоразрешающих систем нового поколения [3, 16, 17].

Следует, однако, отметить, что задача метрологического обеспечения радиометрической калибровки и связанная с этим абсолютизация измерений является одной из самых сложных в современной радиометрии. Применительно к Украине решение этой задачи осложняется рядом дополнительных факторов. Среди них в первую очередь следует назвать несовершенство отечественной оптической эталонной базы, от-

сутствие государственных поверочных схем передачи большинства единиц энергетических величин, недостаток, физический и моральный износ большинства образцовых оптических средств измерений различного ранга и ряд других [12, 19].

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по метрологическому обеспечению измерений энергетических характеристик и радиометрической калибровке отечественных МСУ нового поколения на основе имеющейся и доступной в Украине эталонной и элементной базы.

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКЕ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Многоспектральные сканирующие устройства, используемые в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), существенно различаются по своим характеристикам и параметрам — спектральному диапазону, пространственному и амплитудному разрешению, полю зрения, апертуре, чувствительности и т. д. Для объективного сопоставления и эффективного использования результатов ДЗЗ, получаемых в различных полетных условиях, необходимо соответствующее метрологическое обеспечение, включающее выбор физической единицы измерений, передачу этой единицы от эталона к рабочим средствам

измерений, выбор оптимальной измерительной схемы и элементной базы калибровочной установки, минимизацию погрешности всего измерительного тракта.

В подавляющем большинстве случаев МСУ сканирует по ходу полета ИСЗ небольшой участок земной поверхности и регистрирует лучистый поток, поступающий на многоэлементный приемник излучения в различных участках спектра. И хотя мгновенное поле зрения, апертурный угол и спектральные диапазоны МСУ имеют конечные значения, по принципу работы МСУ относят к радиометрам-яркомерам. Поэтому в качестве радиометрической величины, количественно определяющей исследуемое излучение, принимают спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) [1, 3, 9, 19, 20, 21].

Отметим, что достаточно строго такой подход справедлив в отношении геометрических параметров МСУ – поля зрения и апертурного угла. В отношении же спектральных характеристик, особенно для МСУ с панхроматическими каналами, использование СПЭЯ связано с определенными метрологическими проблемами.

Действительно, связь между измеряемой МСУ радиометрической величиной и выходным сигналом приемника излучения определяется соотношением

$$G = \int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $G$  – выходная реакция приемника излучения МСУ,  $L(\lambda)$  – спектральная яркость исследуемого участка земной поверхности как функция от длины волны  $\lambda$ ,  $S(\lambda)$  – абсолютная спектральная чувствительность МСУ. Отсюда интегральная чувствительность МСУ равна

$$S = \frac{G}{L} = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{L} = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

$$L = \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda.$$

Здесь  $L$  – интегральная (полная) яркость излучателя.

Учитывая, что МСУ работают в спектральных диапазонах различной ширины  $\Delta\lambda$ , и при этом для их градуировки используются излучатели различного спектрального состава, общее выражение (2) для каждого конкретного случая калибровки (градуировки) принимает вид

$$S_U = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} L_{\text{ET}}^O(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

$$S_M = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}(\lambda) S^O(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где  $S_U$ ,  $S_{\Delta\lambda}$ ,  $S_M$  – интегральная, абсолютная и «эффективная» [5] чувствительность спектрального канала МСУ,  $L_{\text{ET}}(\lambda)$ ,  $L_{\text{ET}}^O(\lambda)$  – абсолютная и относительная характеристики градуированного (калиброванного) излучателя,  $S^O(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность спектрального канала МСУ.

На основании этого следует также уточнить и определение МСУ, сделанное ранее. В соответствии с (3)–(5) приборы этого типа целесообразно отнести к спектрально-несогласованным радиометрам-яркомерам.

Использование интегральной чувствительности  $S_U$  (3) при определении яркости исследуемого объекта целесообразно в том случае, когда градуировочный излучатель имеет спектральную характеристику, подобную спектру излучения исследуемого объекта. Выполнение этого условия достигается спектральной коррекцией градуировочного излучателя и возможно при калибровке широкодиапазонных МСУ для типо-

вых измерительных задач, либо при сравнительных оценках МСУ различного типа.

Градуировка МСУ по эффективной чувствительности  $S_M(5)$  целесообразна при сохранении формы характеристик относительной спектральной чувствительности, одинаковой для всех спектральных каналов. Требования к градуировочному излучателю в этом случае несколько снижаются, так как различные спектральные характеристики исследуемых объектов и МСУ можно учесть введением нормирующих коэффициентов.

В связи с отмеченными особенностями различных определений чувствительности в работе [1] предложено при градуировке МСУ определять его чувствительность к СПЭЯ в соответствии с выражением

$$S_{\text{СПЭЯ}} = \frac{G}{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ТР}})} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ЕТ}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ТР}})}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{СПЭЯ}}$  — определяемая чувствительность,  $L_{\text{ЕТ}}(\lambda)$  — СПЭЯ градуировочного излучателя на длине волны  $\lambda_{\text{ТР}}$  в пределах области чувствительности спектрального канала МСУ.

В качестве  $\lambda_{\text{ТР}}$  рекомендуется выбрать такую длину волны, на которой отношение СПЭЯ градуировочного и измеряемого излучателя равно отношению их эффективных яркостей. В этом случае погрешность нормирования чувствительности МСУ будет равной нулю. Соответствующая эффективная длина волны [1] задается следующим отношением:

$$\frac{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ЭФ}})}{L(\lambda_{\text{ЭФ}})} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ЕТ}}(\lambda) S^{\text{О}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda) S^{\text{О}}(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

В этом методе необходимо точно знать СПЭЯ градуировочного излучателя или его спектральную характеристику и интегральное значение яркости. Техническая реализация в этом случае будет значительно проще, чем в предыдущих случаях.

Следует, однако, отметить, что и в этом случае сохраняется неопределенность идентификации

объектов, спектральные характеристики которых существенно различаются. Но эта неопределенность может быть существенно уменьшена различными методами нормировки [2, 4, 25].

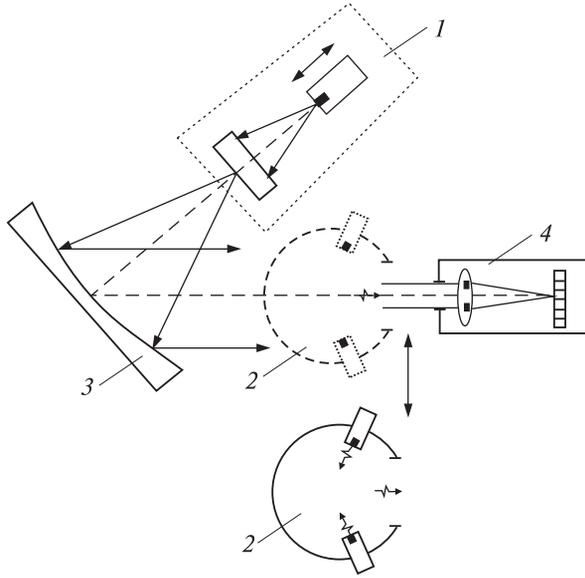
Таким образом, калибровку МСУ наиболее целесообразно проводить по СПЭЯ либо непосредственно компарированием, что всегда точнее, либо косвенными методами, что часто технически проще и экономически целесообразней.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЛИБРОВКИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Обычно при радиометрической калибровке и аттестации МСУ космического базирования решаются следующие задачи [1, 3, 9, 19, 20, 21]:

- измерение относительной функции передачи сигнала (ФПС) — зависимости выходного сигнала МСУ от величины освещенности входной апертуры или яркости тест-объекта (при калибровке);
- измерение зонной характеристики (ЗХ) — относительной неравномерности чувствительности пикселей многоэлементного приемника излучения (МПИ) при равномерной освещенности входной апертуры или проекции тест-объекта с равной яркостью излучающей площадкой;
- измерение относительной спектральной характеристики (СХ) — зависимости амплитуды выходного сигнала от длины волны входящего в МСУ излучения при его постоянной и известной величине;
- измерение темнового сигнала и шумов МПИ;
- абсолютизация измерений ФПС (а в отдельных случаях и ЗХ) путем передачи единицы СПЭЯ от эталона к рабочим излучателям установки.

Требования к измерительной аппаратуре, используемой при их энергетической калибровке МСУ, разработанные на основе анализа характеристик МСУ высокого разрешения, представлены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 также представлены характеристики одной из лучших российских установок «Камелия» [9], которая в настоящее время находится в эксплуатации и проходит регулярную аттестацию как



**Рис. 1.** Обобщенная структурная схема установки для энергетической калибровки МСУ: 1 — излучатель переменной яркости, 2 — диффузный излучатель постоянной яркости, 3 — коллимационный объектив, 4 — МСУ

образцовое средство измерения. Несмотря на некоторые конструктивные и приборные различия известных установок для измерения перечисленных характеристик и параметров МСУ, они выполнены по сходным структурным схемам, обобщенный вариант которых показан на рис. 1.

Для измерения ФПС используется излучатель переменной яркости 1, обычно построенный по схеме обратных квадратов [3, 9, 14]. Но ввиду

незначительной апертуры яркостного поля, формируемого такими излучателями, измерение ФПС производится только для нескольких пикселей, а данные для остальных элементов МПИ получают экстраполяцией результатов измерений ЗХ. Положительным моментом такого метода является то, что ФПС измеряется во всем динамическом диапазоне (который для современных установок составляет 1000—5000). Однако дальнейшее увеличение динамического диапазона связано со значительным ростом габаритов излучателя переменной яркости и обычно не реализуется [14].

Для измерения ЗХ в схему вводится диффузный излучатель 2, построенный в большинстве установок на базе интегрирующей сферы. Излучатель обеспечивает равномерную освещенность всех пикселей МПИ, но его яркость, даже в лучших установках, не превышает 20—30 % от максимально измеряемой [1, 9]. Поэтому значения ЗХ для верхних уровней измеряемой яркости также находятся экстраполяцией.

Другими словами, измерение ФПС и ЗХ производится практически либо для небольшого числа пикселей, либо для малого начального участка динамического диапазона.

Измерение относительной спектральной характеристики производится по схеме, которая показана на рис. 2. Оно осуществляется путем измерения сигнала на выходе МСУ при его облучении монохроматическим потоком, выходящим из монохроматора. Калибровка произво-

**Таблица 1.** Технические требования к аппаратуре для калибровке МСУ

Наименование параметра	Российская установка «Камелия»	Современные требования и ближайшая перспектива	Прогноз
Спектральный диапазон, мкм	0.4–1.2	0.4–1.8	0.3–3.0
Интегральная яркость градуировочного излучателя, Вт/(ср · м <sup>2</sup> )	160	400–600	800–1000
Воспроизводимый диапазон СПЭЯ, Вт/(ср · м <sup>2</sup> · мкм)	12–214	6–530	5–600
Динамический диапазон изменения яркости градуировочного излучателя, относительные единицы	10 <sup>5</sup>	5 · 10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
Выходная апертура градуировочного излучателя, м	0.23	0.6	0.6
Неравномерность яркости выходной апертуры градуировочного излучателя, %	5.0	1.0–2.0	0.5
Погрешность воспроизведения единицы СПЭЯ	0.065	0.02–0.06	0.005–0.015

дится либо через спектрокомпаратор, либо сравнением чувствительности МСУ с известной спектральной чувствительностью образцового приемника излучения.

Для абсолютизации измерения энергетических характеристик обычно используется метод переноса единицы яркости или СПЭЯ от эталонного излучателя к диффузному через объектив (обычно — зеркальный) и компаратор, а от диффузного излучателя к излучателю переменной яркости — через калибруемое МСУ (рис. 3). Таким образом, диффузный излучатель используется как вторичный эталон установки, а калибровка излучателя переменной яркости выполняется в два этапа, причем роль компаратора в этом случае выполняет МПИ калибруемой системы. Кроме очевидного снижения точности при двойной экстраполяции (при измерении ФПС и ЗХ) и двухступенчатой процедуры абсолютизации измерений, рассмотренная методика имеет еще один существенный недостаток, практически исключающий возможность ее использования для калибровки МСУ высокого разрешения — мерцание изображения при различных световых характеристиках отдельных пикселей МПИ в пределах его динамического диапазона [16].

Следует, однако, отметить, что использование рассмотренной методики в известных установках является вынужденной мерой, вызванной прежде всего отсутствием излучателей, позволяющих создавать переменное яркостное поле одновременно в большом динамическом диапазоне и для больших апертур при неизменном спектральном составе излучения.

В работах [16, 17] была предложена новая методика энергетической калибровки МСУ высокого разрешения, свободная от перечисленных выше недостатков и превосходящая по метрологическим характеристикам известные установки. Схема установки, реализующая эту методику, показана на рис. 4. Ее основу составляет оригинальный диффузный излучатель переменной яркости (ДИПЯ) на базе оптически сопряженных интегрирующих сфер [13, 16, 22].

Как показано на рис. 4, источники излучения *I* расположены в первичных интегрирующих

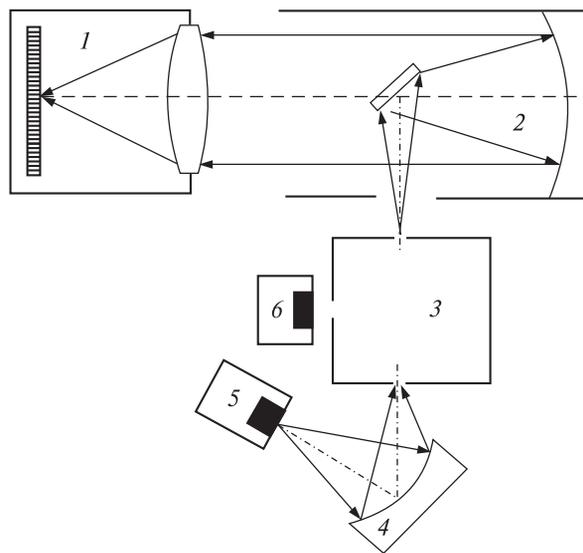


Рис. 2. Схема измерения относительной спектральной чувствительности: 1 — МСУ, 2 — коллимационный объектив, 3 — монохроматор, 4 — конденсор, 5 — широкодиапазонный источник излучения, 6 — образцовый приемник излучения

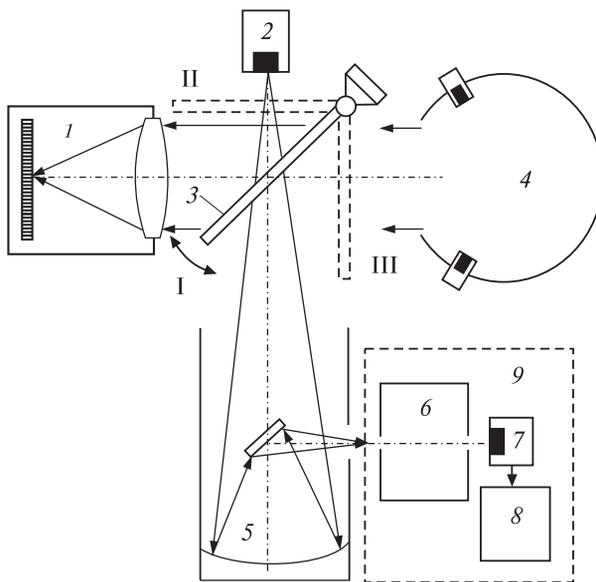
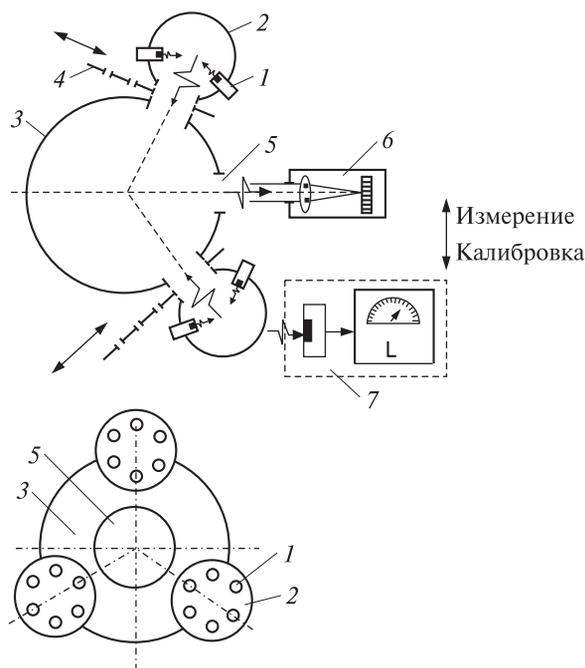


Рис. 3. Схема переноса единицы СПЭЯ диффузному излучателю и измерения абсолютной монохроматической чувствительности МСУ: I — калибровка диффузного излучателя; II — передача единицы СПЭЯ от диффузного излучателя к МСУ; III — перенос единицы СПЭЯ от эталонного излучателя к спектрокомпаратору; 1 — МСУ, 2 — эталонный излучатель, 3 — коммутатор, 4 — диффузный излучатель, 5 — сопрягающий объектив, 6 — монохроматор, 7 — приемник излучения; 8 — регистрирующее устройство, 9 — спектрокомпаратор



**Рис. 4.** Структурная схема перспективной установки для энергетической калибровки МСУ: 1 — источник излучения, 2 — первичная сфера, 3 — вторичная сфера, 4 — калибровочная диафрагма, 5 — выходная апертура, 6 — МСУ, 7 — яркомер

сферах 2, а поток, поступающий из них во вторичную интегрирующую сферу 3, регулируется набором калибровочных диафрагм 4 различного сечения. В выходной апертуре 5 вторичной сферы 3 формируется однородное и переменное по величине яркостное поле с фотометрическим телом, приближающимся к фотометрическому телу ламбертовского излучателя. Это позволяет размещать калибруемое МСУ 6 непосредственно в выходной апертуре ДИПЯ без применения дополнительной сопрягающей оптики.

Основные преимущества рассмотренной методики таковы.

1. Одновременно освещаются все пиксели МПИ во всем динамическом диапазоне измеряемой яркости. Другими словами, измерение ФПС и ЗХ производится одновременно при неизменной конфигурации установки, что исключает необходимость экстраполяции результатов и существенно повышает точность измерений.

Одновременно увеличивается эффективность электронной коррекции чувствительности пикселей МПИ, что позволяет исключить динамическое мерцание изображения.

2. За счет использования большого числа источников излучения в первичных сферах и значительного числа калибровочных диафрагм, выполненных с высокой точностью, значительно расширяется диапазон воспроизводимых яркостей (особенно в сторону больших значений) и повышается точность их установки при неизменном спектральном составе излучения.

3. Вынесением источников излучения из вторичной интегрирующей сферы, которая непосредственно формирует выходное яркостное поле, достигается более благоприятная интегрирующая и антибликовая обстановка, что заметно улучшает равномерность распределения яркости в пределах выходной апертуры.

4. Размещение МСУ непосредственно в выходной апертуре излучателя исключает необходимость применения согласующей и коллимирующей оптики, а также снижает требование к точному позиционированию МСУ относительно установки.

5. Существенно упрощается процедура и повышается точность абсолютизации измерений, так как для калибровки излучателя исключается двухэтапная процедура переноса единицы яркости (СПЭЯ). А для интегральных измерений могут использоваться яркомеры, устанавливаемые непосредственно в выходной апертуре без необходимости точного позиционирования и применения согласующей оптики (рис. 4).

Начиная с 2006 г. в России ведется разработка специального радиометрического комплекса для прецизионной калибровки МСУ нового поколения. Этот комплекс будет состоять из двух установок, которые работают в диапазонах от 0.3—3 мкм и 3—25 мкм [21]. Предполагаемые характеристики комплекса приведены в табл. 1. Известно также, что в этом комплексе будут использоваться высокоапертурные диффузные и монохроматические излучатели, а для их калибровки будут использоваться модели черных тел на точке фазового перехода.

## ЭТАЛОНЫ И МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ЯРКОСТИ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ РАБОЧИМ ИЗЛУЧАТЕЛЯМ

Потенциальные возможности калибровки МСУ определяются используемыми эталонами, схемами передачи яркости или СПЭЯ и точностью используемых метрологических элементов. В значительной степени выбор эталона и поверочной схемы влияет на схему калибровочной установки, метод калибровки МСУ и выбор элементной базы. Поэтому эти вопросы были и остаются ключевыми при разработке калибровочных систем. Однако на разных этапах и в различных странах они решались по-разному.

Первые российские калибровочные установки использовали средства и методы фотомет-

рии, которые базировались на световых и температурных эталонах, а переход к энергетическим величинам осуществлялся путем пересчета [1]. При этом по известной температуре тела накала светоизмерительных ламп находилась его истинная температура, а затем по данным об излучательной способности вольфрама рассчитывалась спектральная яркость лампы. Такой пересчет, а также неопределенность используемых для расчета данных приводили к значительным погрешностям при градуировке. В некоторых случаях для калибровки рабочих излучателей использовались модели черных тел (МЧТ). Потенциальные возможности этого метода очевидны, и в будущем он станет основным для калибровки прецизионных установок, однако до некоторых пор МЧТ имели низкое качество, их метрологические характеристики были недос-

Таблица 2. Обобщенная поверочная схема передачи единицы СПЭЯ

Стандарт	Диапазон значений воспроизводимого параметра		Средство воспроизведения величины	Среднеквадратичное отклонение воспроизведения единицы	Неисключенная систематическая погрешность	Метод передачи единицы
	$\lambda$ , мкм	СПЭЯ, Вт/(ср·м <sup>3</sup> )				
<i>Государственные эталоны</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	МЧТ, ленточные лампы	$0.1 \cdot 10^{-2}...1.5 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-2}...2.0 \cdot 10^{-2}$	Компаратор Непосредственное сравнение $0.2 \cdot 10^{-2}...0.8 \cdot 10^{-2}$ Косвенные измерения, компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...25	$10^7...10^{12}$		$0.1 \cdot 10^{-2}...1.5 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-2}...2.0 \cdot 10^{-2}$	
Проект ДСТУ	0.2...2.5	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{11}$	МЧТ	$0.5 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	
<i>Рабочие эталоны</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	Ленточные лампы, полостные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...2.5 \cdot 10^{-2}$	—	Компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...25	$10^7...10^{12}$	МЧТ, ленточные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...2.5 \cdot 10^{-2}$	—	Прямые измерения, компаратор
Проект ДСТУ	0.2...2.5 0.2...25	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{12}$ $4 \cdot 10^4...10^{12}$	МЧТ, ленточные, галогенные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...6 \cdot 10^{-2}$ $0.5 \cdot 10^{-2}...8 \cdot 10^{-2}$	—	Косвенные измерения, компаратор
<i>Образцовые средства измерения</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	Ленточные лампы, полостные лампы	$1 \cdot 10^{-2}...4 \cdot 10^{-2}$	—	Компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...10	$10^7...10^{12}$	МЧТ, ленточные, галогенные, дейтериевые лампы	$6 \cdot 10^{-2}...8 \cdot 10^{-2}$	—	Прямые измерения, компаратор
Проект ДСТУ	0.2...10	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{11}$	Ленточные лампы	$2 \cdot 10^{-2}...12 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-2}...6 \cdot 10^{-2}$ (по Гос. эталону)	—	Косвенные измерения, компаратор

таточно изучены, а стоимость была достаточно высокой. Поэтому калибровка излучателей по МЧТ не получила широкого распространения.

Ситуация существенно изменилась после создания и введения в эксплуатацию в 1976 г. Государственных эталонов энергетической фотометрии СССР и соответствующих поверочных схем [11], которые регламентировали передачу единицы СПЭЯ в спектральном диапазоне 0.25...2.5 мкм. Начиная с системы «Фрагмент», все российские МСУ калибруются с использованием этих поверочных схем (см. табл. 2) [1]. В 1989 г. в СССР был введен ГОСТ 8.195, который регламентирует передачу единицы СПЭЯ, спектральной плотности силы излучения и энергетической освещенности в спектральном диапазоне 0.2...25.0 мкм. А в 2003 г. введен ГОСТ 8.023 для измерения световых величин непрерывного и импульсного излучения, который стал международным стандартом стран СНГ, но Украина к этому стандарту не присоединилась.

В 2000 г. в Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии Госстандарта Украины был разработан документ «Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості у діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 25 мкм, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини освітленості в діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 2.5 мкм, потужності випромінювання, сили випроміню-

вання та енергетичної освітленості в спектральних інтервалах від  $1 \cdot 10^{-1}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  мкм в діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 2.5 мкм» (разработчики Л. Назаренко, О. Купко, В. Каштаньер) с частичной отменой ГОСТ 8.195-89, который мог бы послужить хорошей базой для метрологического обеспечения калибровки отечественных МСУ. Фрагменты этой поверочной схемы, относящиеся к единицам СПЭЯ, приведены в табл. 2. Однако, насколько нам известно, до настоящего времени указанный стандарт в действие не введен.

В качестве рабочих эталонов для калибровки МСУ в России используются ленточные лампы типа СИ(СИРШ)-200У и СИ10-300У (см. табл. 3) [1]. Следует отметить, что кроме очевидных достоинств таких излучателей, они имеют два серьезных недостатка — неравномерность распределения яркости по площади вольфрамовой ленты и изменение этого распределения в процессе эксплуатации [10]. Первый недостаток частично устраняется использованием только небольшого участка ленты (примерно  $0.5 \times 1.2$  мм), что реализуется конструктивными мерами, а второй — периодической калибровкой лампы по эталону. Отметим, что в Украине ленточные лампы не производятся, а парк имеющихся постоянно сокращается.

Поэтому для Украины весьма перспективным является использование в качестве эталонов яркости и СПЭЯ галогенных ламп с цветовой тем-

Таблица 3. Светоизмерительные лампы накаливания, рекомендуемые для калибровки МСУ

Тип излучателя	Страна и компания-производитель	Электрические параметры		Фотометрические параметры			Стабильность	Габариты тела накала, мм	Измеряемая величина
		P, Вт	U, В	T, К	I, кд	Φ, Вт			
СИС 107-500	Россия	365	107	2800	500	—	15 ч/18 мес	25 × 30	Сила света
СИС 107-1500	Россия	915	107	2860	1500	—	15 ч/13 мес	28 × 35	Сила света
СИП 107-500	Россия	74	107	2800	—	500	25 ч/18 мес	25 × 15	Световой поток
СИП 107-1500	Россия	260	107	2800	—	3500	25 ч/18 мес	25 × 15	Световой поток
СИРШ 6-100	Россия	100	6	2840	—	—	200 ч/12 мес	2 × 8	Яркость
СИРШ 8.5-200	Россия	212	8.5	3000	—	—	300 ч/12 мес	2 × 10	Яркость
WI 14	Германия, Osram	90	5	2400	—	—	—	1.6 × 8	Яркость
LF 300	Великобритания, Polaron	300	100	2750	—	4000	1 %/100 ч	—	Световой поток
LIS 3000	Великобритания, Polaron	616	19.2	3000	740	—	1 %/100 ч	10 × 15	Сила света

пературой 2300 К и 2800 К (см. табл. 4) [12]. Преимущества галогенных ламп особенно проявляются в сочетании с фотометрами, которые обеспечивают долговременную воспроизводимость передаваемых единиц. Для улучшения равномерности яркостного поля, которое формируется галогенными лампами, в работе [15]

предложен метод их использования совместно с диффузными рассеивателями из молочного стекла. При этом в зависимости от типа лампы и марки молочного стекла представляется возможность получить рабочую зону размером  $18 \times 30$  мм с равномерностью яркости не ниже 99.95 %. Галогенные лампы имеют очень высо-

Таблица 4. Галогенные лампы, рекомендуемые для использования в качестве образцовых средств змерения и рабочих эталонов калибровочных установок

Тип излучателя	Страна и компания-производитель	Электрические параметры		Фотометрические параметры		Время жизни, ч	Габариты, мм	Измеряемая величина
		$P$ , Вт	$U$ , В	$T$ , К	$\Phi$ , лм			
КГМ 12-100	Россия	100	12	3000	3000	85	$44 \times 12.5$	Яркость
КГМ 24-150	Россия	150	24	3000	5000	50	$47 \times 12.5$	Яркость
КГМ 24-150-3	Россия	250	24	3000	8500	150	$70 \times 12.5$	Яркость
КГМ 30-300-2	Россия	300	30	3200	—	55	$55 \times 16$	Яркость
КГМ 36-400	Россия	400	36	3200	14500	50	$60 \times 18$	Яркость
ТРУ 1100-2350	Россия	300	10	2350	—	50	$50 \times 72$	Яркость
ТРШ 2850-3000	Россия	440	55	2850	—	255	$39 \times 135$	Яркость
Halostar 64435	Германия, Osram	100	12	3000	2200	1000	$33 \times 9.5$	Яркость
FEL (Ge Lamp)	США	1000	120	3200	27500	375	$70 \times 22$	Яркость

Таблица 5. Сравнительная оценка схем передачи единицы СПЭЯ

Излучатель	ДВ (12 ламп КГМ 30-300)	СИРШ 8.5-200	СИС 107-1500	КГМ 30-300-2 с рассеивателем	ДИПЯ(1 лампа СИП 107-1500)
Интегральный поток на выходе излучателя, $\Phi$ , Вт	144	22	300	100	6.5
Интегральный коэффициент пропускания оптического тракта, $\tau_0$	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-8}$
Монохроматический поток на выходе коллиматора, $\Phi_\lambda$ , Вт/мкм	$5.5 \cdot 10^{-9}$	$8.5 \cdot 10^{-6}$ $2.6 \cdot 10^{-7}$ **	$7.1 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-9}$
Сигнал на выходе приемника излучения, $U_C$ , В	$2 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-2}$ $2.3 \cdot 10^{-3}$ **	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$
Сравнительная величина выходного сигнала, $U_0 = U_C / U_{C_{MAX}}$ , относительные единицы	$2.7 \cdot 10^{-3}$	1.0	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$10^{-3}$
Погрешность передачи единицы СПЭ, $\delta$	0.055–0.11	0.044–0.060	0.055–0.11	0.055–0.077	0.044–0.055
Сравнительная величина погрешности передачи единицы СПЭЯ *, $\delta_0 = \delta / \delta_{MAX}$ , относительные единицы	1.0	0.7	1.0	0.85	0.65
Коэффициент сравнения яркости схемы передачи единицы СПЭЯ, $\xi = U_0 / \delta_0$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	1.4 $4.35 \cdot 10^{-2}$ **	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
Примечания	Калибруемый излучатель	Прямой перенос единицы СПЭЯ	Пересчет единицы СПЭЯ	Прямой перенос единицы СПЭЯ	СПЭЯ определяется косвенным методом и расчетом

\* — среднее значение, \*\* — при использовании участка ленты  $0.5 \times 1.2$  мм

кую кратковременную стабильность и постоянную рабочую зону. Полная теория излучателей на основе галогенных ламп с рассеивателями и результаты их экспериментального исследования приведены в работах [15, 18].

Как показал анализ известных установок [1, 3, 9, 20], калибровка рабочих излучателей по яркости и СПЭЯ сопровождается следующими основными погрешностями:

1. Погрешность передачи единицы СПЭЯ от эталона в соответствии с поверочной схемой.
2. Нестабильность калибровочных излучателей.
3. Нелинейность и нестабильность спектрокомпаратора.
4. Невоспроизводимость установки длин волн монохроматоров излучателя и компаратора.
5. Несогласованность спектральных характеристик излучателей установки.
6. Погрешности геометрического базирования калибровочной схемы.

Прогнозируется, что погрешности калибровки будут составлять от 1 до 3 % [1, 9, 19, 20, 21]. В упоминавшейся выше установке «Камелия» эти погрешности составляют 6.5 % [9]. С учетом перспективной поверочной схемы ДСТУ (табл. 2) можно предполагать снижение погрешностей калибровки излучателей до уровня 2—6 %. Очевидно, что достижение погрешности калибровки излучателей менее 1 % потребует принципиально нового подхода как к методам калибровки, так и к выбору эталона. В этом плане перспективным представляется использование в качестве эталона МЧТ на фазовых переходах [24], от которых единица СПЭЯ передается непосредственно рабочим излучателям установки. Представляет интерес и калибровка излучателей по световому потоку, что соответствует генеральному направлению современной оптической метрологии [7, 8]. Очевидно, что в этом случае схема калибровочной установки, предложенная в работах [16, 17], является наиболее перспективной.

В работе [19] рассмотрена инженерная методика подбора и оценки эталонного излучателя для передачи единицы СПЭЯ рабочим излучателям калибровочной установки. Эта методика предусматривает оценку как энергетических,

так и метрологических характеристик калибровочной схемы (рис. 3). В качестве обобщенного критерия принят параметр  $\xi$ , который учитывает потери энергии в измерительной схеме для конкретной пары излучатель-приемник, сигнал на выходе спектрокомпаратора и относительные погрешности передачи единицы. Результаты сравнительного анализа для наиболее перспективных излучателей и приемников представлены в табл. 5. Как и предполагалось, лучшие характеристики обеспечивают ленточные лампы и галогенные лампы с рассеивателями. Важным преимуществом применения галогенных ламп с рассеивателями является тот факт, что такие лампы изготавливаются в Украине.

### КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ГРАДУИРОВАННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Высокие фотометрические характеристики диффузных излучателей переменной яркости на базе интегрирующих сфер позволяют проводить абсолютизацию измерений по СПЭЯ косвенными методами с использованием радиометров. Эти методы, хотя и дают меньшую точность, но обеспечивают возможность использования имеющегося на Украине метрологического оборудования без обращения к дорогостоящим зарубежным эталонам яркости и СПЭЯ. Косвенные методы калибровки можно использовать и как вспомогательные, обеспечивающие лучшую воспроизводимость результатов в течение длительного времени.

Возможны три следующих направления использования косвенных методов:

- калибровка по интегральной яркости с последующим переходом к СПЭЯ по измеренным спектральным характеристикам ДИПЯ;
- калибровка по эталону светового потока с компарированием освещенности выходной апертуры;
- калибровка по измеренной освещенности выходной апертуры с последующим пересчетом СПЭЯ по известным геометрическим параметрам ДИПЯ и его спектральной характеристике.

Во всех этих случаях могут использоваться прецизионные отечественные люксметры, яр-

Таблица 6. Отечественные средства измерения фотометрических величин

Тип прибора	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Спектральный диапазон, мкм	Основная относительная погрешность, %
Кварц 01	Освещенность	$10^{-3} \dots 10^5$ лк	0.25 ... 1.05	5
	Мощность	$2 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^3$ мкВт	0.25 ... 1.05	7
Кварц 21	Освещенность	$10^{-1} \dots 10^5$ лк	0.38 ... 0.78	5...7
ТЭС 0693* (цифровой)	Освещенность	$10^{-1} \dots 10^5$ лк	0.38 ... 0.78	5
	Яркость	$10 \dots 2 \cdot 10^5$ кд/м <sup>2</sup>	0.38 ... 0.78	7
РАТ – 2п	Энергетическая освещенность	$10 \dots 2 \cdot 10^4$ Вт/м <sup>2</sup>	0.2 ... 2.5	6

\* — по специальному заказу диапазон измерений может быть расширен и введена функция измерения энергетической освещенности

кометры и фотометры — «Кварц-01», «Кварц-02» и ТЭС 0693 (табл. 6) [23].

Как отмечалось выше, ДИПЯ имеют высокую однородность яркостного поля на выходной апертуре и фотометрическое тело, близкое к ламбертовскому излучателю. Поэтому точность позиционирования яркомера относительно излучателя принципиального значения не имеет. Кроме этого, высокая линейность градуировочной характеристики ТЭС 0693 позволяет проводить калибровку ДИПЯ практически во всем диапазоне воспроизводимых яркостей.

Наибольшую точность, которая в основном определяется точностью яркомера, обеспечивает первый метод. Измерение интегральной яркости при этом производится при установке яркомера непосредственно в выходной апертуре ДИПЯ (см. рис. 4), а его относительная спектральная характеристика измеряется по схеме, сходной с той, которая показана на рис. 2. Абсолютные значения вычисляются обычным способом. Основным недостатком и источником основной погрешности является относительно узкий спектральный диапазон яркомера. Этот метод также может использоваться для прямой калибровки излучателя по интегральной яркости в малом диапазоне длин волн.

Во втором методе внутри ДИПЯ устанавливается светоизмерительная лампа типа СИП. Эта лампа используется для калибровки по световому потоку, а в качестве компаратора освещенности выходной апертуры может быть исполь-

зован люксметр ТЭС 0693. Таким образом, непосредственно калибруются по потоку первичные излучатели ДИПЯ, а величина СПЭЯ определяется расчетом по геометрическим параметрам вторичной интегрирующей сферы и ее измеренной относительной спектральной характеристике. Отметим, что в этом методе вторичная интегрирующая сфера играет роль фотометрического шара. Очевидно, что точность калибровки по СПЭЯ будет существенно ниже. Тем не менее, этот метод является удобным для контроля стабильности и режима работы источников излучения, так как параметры интегрирующих сфер в значительной степени влияют на результат измерений. К достоинствам данного метода следует отнести доступность и распространенность ламп типа СИП, не критичность метода к выбору компаратора. Следует подчеркнуть, что хотя калибровка диффузного излучателя по потоку может применяться и в установках типа «Камелия», наличие в интегрирующей сфере значительного количества ламп с арматурой создает сложную систему бликов и засветок, которая отрицательно сказывается на точности калибровки.

Еще меньшую точность обеспечивает третий метод, который является в принципе расчетным и может использоваться только для грубой оценки фотометрических характеристик диффузного излучателя.

Основные энергетические и метрологические характеристики рассмотренных методов приведены в табл. 5.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены и проанализированы методы и схемы калибровки измерительных установок для предполетной аттестации МСУ космического базирования. Показано, что в качестве единицы измерения параметров МСУ целесообразно выбрать спектральную плотность энергетической яркости, передаваемой от эталона методом компарирования.

2. Сформулированы требования к калибровочным установкам нового поколения и показаны пути их схмотехнической реализации. Научно обоснованы преимущества калибровочных установок на основе ДИПЯ.

3. Проведено исследование эталонов и поверочных схем для передачи единицы СПЭЯ от эталонов к рабочим излучателям для калибровки измерительных установок. Предложено в качестве рабочего эталона использовать отечественные галогенные лампы с диффузным рассеивателем из молочного стекла. Такие рабочие эталоны обеспечивают метрологические характеристики, сопоставимые с характеристиками зарубежных ленточных ламп.

4. Выполнен анализ методов косвенной калибровки градуировочных излучателей с использованием отечественной фотометрической аппаратуры. Доказана возможность достижения точности калибровки на уровне 5–7 % при использовании доступной в Украине элементной и эталонной базы.

Полученные результаты будут представлять интерес для специалистов в области оптической радиометрии и метрологии, в особенности — разработчикам аппаратуры для энергетической калибровки МСУ высокого разрешения.

1. *Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Сычев А. Г. и др.* Метрологическое обеспечение измерений яркости земной поверхности многозональной сканирующей системой «Фрагмент» // Исслед. Земли из космоса. — 1981. — № 5. — С. 65–77.
2. *Богданов А. А., Налимов В. Н., Сычев А. Г. и др.* О возможном повышении спектрорадиометрической точности при дистанционных исследованиях Земли с помощью многозональных съемочных систем // Исслед. Земли из космоса. — 1981. — № 3. — С. 77–85.
3. *Вариченко Л. В., Колобродов В. Г., Ладыка Я. Е. и др.* Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 2/3. — С. 59–69.
4. *Гогохия В. В.* Методы восстановления спектральной плотности энергетической яркости природных объектов по интегральным измерениям // Исслед. Земли из космоса. — 1982. — № 6. — С. 95–102.
5. *Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС — Ассоциация. Информ. бюл. — 2002. — № 4 (36). — С. 6–11.
6. *Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС — Ассоциация. Информ. бюл. — 2002. — № 5 (37). — С. 7–12, 43–45.
7. *Золотаревский Ю. М., Иванов В. С., Котюк Л. Ф. и др.* Методические основы и перспективы развития современной оптической радиометрии // Измерит. техника. — 2005. — № 11. — С. 8–12.
8. *Иванов В. С., Саприцкий В. И., Огарьев С. А. и др.* Международный проект по воспроизведению люмена // Светотехника. — 2002. — № 5. — С. 3–10.
9. *Киселев И. Л., Коростелев Л. Н., Караева М. К. и др.* Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Исслед. Земли из космоса. — 1991. — № 2. — С. 34–43.
10. *Ковальский В. Я., Мальцев В. В., Налимов В. Н. и др.* Методика учета неоднородности яркости образцовых ламп при градуировке фотометров // Оптико-мех. пром-сть. — 1980. — № 11. — С. 13–16.
11. *Котюк А. Ф., Панасюк В. С., Самойлов Л. Н. и др.* Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения // Измерит. техника. — 1976. — № 3. — С. 17–24.
12. *Купко А. Д., Назаренко Л. А.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 38–40.
13. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер // Технол. и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 6 (66). — С. 61–64.
14. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Теория и расчет диффузного излучателя переменной яркости на законе обратных квадратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2006. — № 1. — С. 73–80.
15. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Вторичный эталон яркости на базе галогенной лампы с диффузным рас-

- сеивателем // Технол. и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — 2008. — № 3 (70). — С. 61–64.
16. Міхеєнко Л. А., Шишкін В. А. Дифузний випромінювач змінної яскравості для калібрування прецизійних цифрових відеосистем // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 1. — С. 114–120.
17. Міхеєнко Л. А. Енергетичне калібрування оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності // Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи». — Київ: НТУУ «КПІ», 2009. — С. 42.
18. Міхеєнко Л. А., Коваленко А. В. Фізико-математична модель випромінювача з розсіюючим елементом // Вістник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2008. — Вип. 36. — С. 31–37.
19. Міхеєнко Л. А., Микитенко В. І. Методи, засоби та метрологічне забезпечення калібрування еталонних випромінювачів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2008. — № 6. — С. 94–99.
20. Мухмедьяров Р. Д., Глушков А. С., Михайлов А. С. и др. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. — 1991. — № 1. — С. 64–74.
21. Панфилов А. С., Бударкин А. А., Иванов В. С. и др. Работы ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения радиометрической калибровки и полетного контроля стабильности оптической аппаратуры наблюдения Земли // 6-я Всерос. открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. ст. — 2007. — С. 288–294.
22. Пат. України № 78609. Дифузний випромінювач / Л. А. Міхеєнко, В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко та ін. // 2007. — Бюл. № 4.
23. Столяревская Р. И. Методы исследования метрологических характеристик. Приборы для измерения световых величин // Светотехника. — 1988. — № 6. — С. 21–26.
24. Хлевной Б. Б., Огарьев С. А., Саприцкий В. И. и др. Эталонные источники типа «черное тело» в диапазоне 100–3500 К для прецизионных измерений в радиометрии, фотометрии и оптической термометрии // Измерит. техника. — 2005. — № 11. — С. 29–35.
25. Холопов Г. К., Хисамов Р. Ш., Хузин Ф. Г. Нормирование чувствительности радиометрической аппаратуры для исследования природных ресурсов Земли // Исслед. Земли из космоса. — 1984. — № 4. — С. 81–88.

Надійшла до редакції 18.06.09

L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky

#### METROLOGICAL SUPPORT OF RADIOMETRIC CALIBRATION OF OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS FOR THE EARTH REMOTE SENSING

We present an analysis of techniques, schemes and apparatus for the absolutization of measurements of energetic characteristics and calibration of opto-electronic instruments for the Earth remote sensing. Some new schemes and techniques are proposed for the Ukrainian space systems of high amplitude and spatial resolution which guarantee a high metrological level of the measurements with the use of the components and instruments available in Ukraine.

УДК 528.88.63

О. І. Сахацький<sup>1</sup>, Г. М. Жолобак<sup>1</sup>, Г. А. Макарова<sup>2</sup>, О. А. Апостолов<sup>1</sup>, М. В. Ющенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup>Миколаївський обласний державний проектно-технологічний центр охорони родючості ґрунтів і якості продукції

## КЛАСИФІКУВАННЯ ЗЕМНОГО ПОКРИТТЯ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ MODIS ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОСІВІВ ОЗИМИХ ЗЕРНОВИХ У МЕЖАХ АДМІНІСТРАТИВНИХ РАЙОНІВ КИЇВСЬКОЇ ТА МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТЕЙ УКРАЇНИ

*Висвітлено результати застосування різночасових знімків MODIS для визначення площі посівів озимих зернових у межах адміністративних районів Київської та Миколаївської областей України. Показано, що відхилення дистанційно визначених розмірів площ посівів озимих зернових від статистичних даних у межах окремих адміністративних районів коливається в досить широкому діапазоні, але в цілому для області становить близько 10 %. Встановлено, що значення індексу NDVI за листопад 2007 р. та його сума за осінній період вегетації 2007 р. достовірно розрізняються у різних за станом посівів озимих зернових Миколаївської області.*

### ВСТУП

Сучасний стан розвитку засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє використовувати їх для розв'язання різнопланових задач, що виникають при вирішенні актуальних проблем сільськогосподарського виробництва. Поява в останні роки супутникових систем, які мають досить високу просторову і часову розрізненість та забезпечують надходження інформації з будь-якого району спостережень, уможливила створення принципово нових технологій моніторингу сільськогосподарських земель. В залежності від масштабу проблем застосовують відповідні супутникові знімки. Зокрема, в разі необхідності дослідити неоднорідність родючості ґрунту в межах одного поля фахівцям потрібно скористатися знімками з високою просторовою розрізненістю зі супутників «Ikonos», «Quick Bird». Якщо ж за мету поставлено прослідкувати за мінливістю ґрунтових показників чи спрогнозувати врожайність окремих культур у межах адміністративних одиниць (районів, областей), то в цьому випадку треба користуватись супут-

никовими знімками середньої або й низької просторової розрізненості.

В країнах, де середня площа одного поля перевищує 50 га, найбільш придатними для такого моніторингу виявляються дистанційні дані зі системи Terra-MODIS (просторова розрізненість 250 м у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах), які забезпечують достатню роздільну здатність і високу періодичність зйомки. Саме ці знімки взято за основу для розбудови системи автоматизованого збору, обробки і розповсюдження супутникових даних, що створюється в Російській Федерації спільними зусиллями фахівців з Головного обчислювального центру Міністерства сільського господарства (МСГ) РФ та Інституту космічних досліджень РАН в рамках проектів МСГ РФ [1]. Моніторинг землекористування в Республіці Казахстан з 2002 р. також ґрунтується на даних TERRA/MODIS, які прийшли на зміну супутниковій інформації низької просторової розрізненості NOAA (1 км) та середньої розрізненості російського супутника «Ресурс»/МСУ-СК (160 м), котра свого часу застосовувалась для визначення розмірів посівних площ ярих зернових культур [8, 9].

Входження України в глобальний економічний простір також потребує більш інтенсивного

використання оперативної інформації про стан агросфери та різноманітних прогнозних оцінок для прийняття кваліфікованих управлінських рішень. До того ж в Україні розробляється Концепція науково-технічної програми «Моніторинг агроресурсів та прогнозування їхнього стану з використанням даних дистанційного зондування» (скорочено «Агрокосмос»), котра має стати першим кроком для створення державної агроінформаційної системи моніторингу агроресурсів. Однією з її складових є дослідження засобами дистанційного зондування таких рослинних ресурсів як площі основних сільськогосподарських культур, стан посівів, прогнозування урожаю тощо.

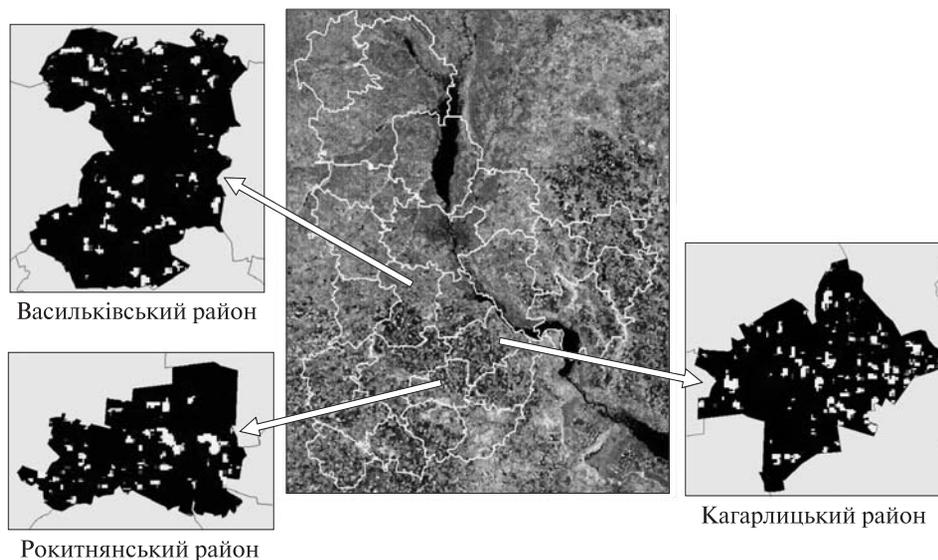
Виходячи з вищезазначеного і беручи до уваги той факт, що Україна є потужною аграрною країною, можна стверджувати, що розвиток методів дистанційного моніторингу агроресурсів за допомогою супутникової системи TERRA/MODIS стоїть в ряду пріоритетних завдань як у галузі наук про Землю, так і в агровиробничій сфері.

Метою роботи є висвітлення результатів застосування різночасових знімків зі системи Terra-MODIS для визначення площі посівів озимих зернових у межах адміністративних районів Київської та Миколаївської областей України та дослідження кількісних параметрів спектраль-

них відмінностей посівів озимих зернових різного якісного стану.

## СУПУТНИКОВА ОЦІНКА ПОСІВІВ ОЗИМИХ КУЛЬТУР КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

В ЦАКДЗ ІГН НАНУ з 2004 р. ведеться робота із залучення знімків MODIS для вдосконалення методики дистанційного прогнозування врожайності озимої пшениці на рівні адміністративних районів. В листопаді — грудні 2005 р. на підставі класифікації земного покриття за космічними знімками супутника MODIS/TERRA нами вперше в Україні були визначені площі посівів озимих культур (озимих зернових та озимого ріпаку) в межах Київської області під урожай 2006 р. [4]. Для класифікації озимих посівів було створено синтезоване зображення, яке включало індекси NDVI, розраховані на підставі безхмарних знімків MODIS за осінній період 2005 року. Виділення посівів озимих культур на цьому зображенні здійснювалось програмою ERDAS Imagine і забезпечувалося наземними завірковими даними, які були отримані в результаті польових маршрутних обстежень посівів озимих культур восени того ж року в межах Бориспільського, Баришівського, Переяслав-Хмельницького, Кагарлицького, Миронівського та Фастівського районів Київської області.



**Рис. 1.** Виділення посівів озимих зернових в межах адміністративних районів Київської області

Подальше вдосконалення методики дозволило виокремлювати зі синтезованого зображення окремі адміністративні райони і вести там автоматизований підрахунок кількості пікселів, що були віднесені програмою ERDAS Imagine до класів озимих зернових чи озимого ріпаку (рис. 1).

Це дало можливість на підставі осінніх дистанційних даних 2006 року вперше розрахувати розміри площ посівів озимих культур під урожай 2007 р. в межах адміністративних районів Київської області [5, 6]. Для визначення достовірності отриманих результатів було зіставлено розміри дистанційно визначених площ посівів озимої пшениці з офіційно задекларованими Головним управлінням статистики у Київській області [7] (табл. 1).

Як бачимо, відхилення дистанційно визначених розмірів площ посівів озимої пшениці під урожай 2007 р. від офіційно задекларованих для більшої частини адміністративних районів сягає менше 15 % як в сторону збільшення, так і в сто-

рону зменшення, а в цілому сумарна для області ця похибка становить –11 %. Дистанційний недобір площ озимої пшениці може бути пояснено тим, що дуже добре розкущені її посіви мали такі ж значення індексів NDVI, як і посіви озимого ріпаку. Власне цей факт засвідчив появу проблеми розділення посівів озимої пшениці та озимого ріпаку під час класифікації осінніх знімків. Певні напрацювання в її вирішенні нами вже здобуто, але вони спрацьовують лише тоді, коли аграрії чітко дотримуються вимог технології вирощування цих двох озимих культур, тому на доступних нам знімках повне і точне їхнє розпізнавання поки що забезпечується не кожного року.

### СПЕКТРАЛЬНІ ВІДМІННОСТІ РІЗНИХ ЗА СТАНОМ ПОСІВІВ ОЗИМИХ ЗЕРНОВИХ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Щоб досягти успіху у якісному розділенні класів озимих культур, необхідно володіти інформа-

Таблиця 1. Площа посівів озимої пшениці в межах адміністративних районів Київської області під урожай 2007 року (за даними осінньої 2006 р. зйомки MODIS)

Номер п/п	Район	Усереднена дистанційна оцінка площ посівів озимої пшениці під урожай 2007 р., га	Збережена площа посівів озимої пшениці на зерно під урожай 2007 р. (за статистичними даними), га	Відхилення площ, визначених дистанційно, від статистично задекларованих, %
1	Баришівський	8578	8643	–1
2	Білоцерківський	13930	18175	–23
3	Богуславський	7338	7552	–3
4	Бориспільський	9425	9292	1
5	Броварський	4885	5242	–7
6	Васильківський	7758	10415	–26
7	Володарський	9665	8526	13
8	Згурівський	8202	9857	–17
9	Кагарлицький	10229	12529	–18
10	Києво-Святошинський	2378	2078	14
11	Макарівський	3481	3300	5
12	Миронівський	12529	11384	10
13	Обухівський	5691	5552	3
14	Переяслав-Хмельницький	20008	20196	–1
15	Рокитнянський	5614	6991	–20
16	Сквирський	13221	18623	–29
17	Ставищенський	8795	11139	–21
18	Таращанський	11853	12211	–3
19	Тетіївський	5737	9167	–37
20	Фастівський	5033	7170	–30
21	Яготинський	11786	11220	5
	Разом	186136	209262	–11

цією про їхні спектральні відмінності, за котрими можна здійснювати моніторинг, маючи в розпорядженні знімки зі системи Terra-MODIS. Тому наші подальші дослідження були спрямовані на з'ясування теоретичного аспекту пошуку детальних відмінностей спектральних образів посівів озимої пшениці, а також на практичне визначення площ посівів цієї культури в основних зернових регіонах держави.

Для цього територію наземних досліджень було розширено на Миколаївську область, яка за площею посівів озимих зернових культур (400–600 тис. га) входить до трійки областей-лідерів. Під час осіннього вегетаційного сезону 2007 р. нами було обстежено 198 посівів сільськогосподарських культур, з яких дві третини припадало на озимі зернові колосові, та ідентифіковано вісім класів рослинного покриття сільськогосподарського призначення.

Озимі зернові на території області знаходились переважно в доброму та задовільному стані. Обстежені нами посіви було згруповано за фазами вегетації у три групи: початок кушіння, кушіння та повністю розкушені. До першої групи в основному входили посіви озимого ячменю, а до двох інших — озимої пшениці та жита. Оскільки поля з озимим ячменем мали незначне проективне покриття, то наші дослідницькі інтереси було зосереджено на інших озимих зернових колосових культурах. Через те, що озиме жито в озимому зерновому клині Миколаївщини займає порівняно незначну частку (приблизно 1%), то ці інші озимі зернові представлені переважно озимою пшеницею. Але ми надалі будемо вживати термін більш загальний «озимі зернові колосові культури», хоча основний вклад у формування спектрально-го образу озимого зернового клину Миколаїв-

щини вносять, беззаперечно, саме посіви озимої пшениці.

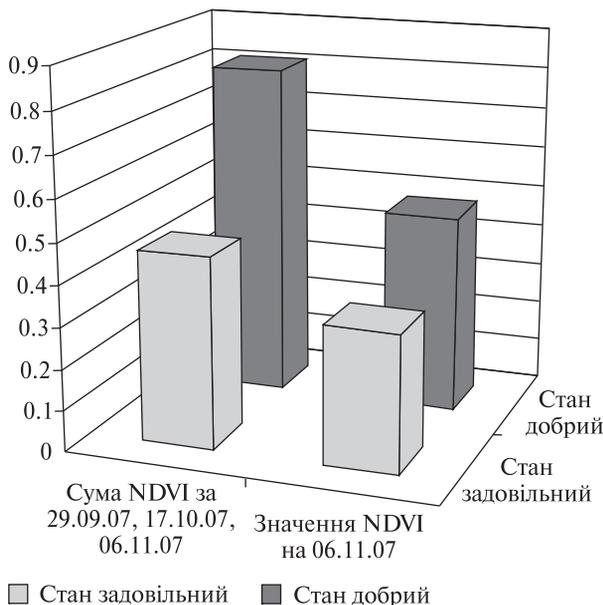
На підставі зібраних наземних даних стало можливим визначити, чи відрізняються між собою за спектральними показниками різноякісні посіви озимих зернових. Для цього нами проаналізовано сигнатури обстежених посівів, попередньо згрупованих за тотожністю стану та фази вегетації. Зокрема, для обліку було взято 20 посівів, які знаходились у фазі кушіння (1.5–2 сформовані стеблини), стан задовільний, та 63 посіви, які були повністю розкушені (3–5 сформованих стеблин), стан добрий.

До речі, проведені ще восени 2005 р. наземні завіркові роботи в окремих районах Київської області показали, що отримані дані космічної зйомки реагують на зміну проективного покриття, викликану процесом кушіння озимих зернових [4]. Дослідження 2007 р. дозволили глибше зрозуміти, як формується така реакція, та отримати кількісні параметри спектральних відмінностей посівів озимих зернових. Зокрема, для них проаналізовано динаміку індексу NDVI протягом вересня–листопада 2007 р. (табл. 2).

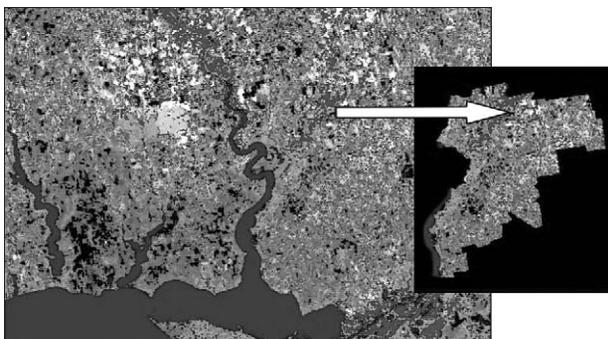
На підставі даних табл. 2 можна зробити висновки, що математично достовірні відмінності між різними за станом посівами озимих зернових у Миколаївській області спектродіаметр MODIS зафіксував на останню дату спостережень — 6 листопада 2007 р., коли значення індексу NDVI повністю розкушених посівів озимих зернових майже у півтора рази перевищували відповідні значення посівів цих культур, що перебували у задовільному стані, а рівень стандартних відхилень був невисоким, що засвідчує добру вирівненість посівів. Сума NDVI також надійно відображала стан проективного покриття поля зеленими пагонами рослин ози-

Таблиця 2. Зміна індексу NDVI посівів озимих зернових Миколаївської області восени 2007 р. за даними спектродіаметра MODIS

Характеристика посіву озимих зернових	Дата розрахунку індексу NDVI, 2007 р.			Сума NDVI
	29 вересня	17 жовтня	6 листопада	
Стан посіву задовільний	$-0.01 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.06$	$0.33 \pm 0.06$	$0.46 \pm 0.12$
Стан посіву добрий	$0.04 \pm 0.08$	$0.28 \pm 0.10$	$0.48 \pm 0.05$	$0.81 \pm 0.19$



**Рис. 2.** Спектральні відмінності між посівами озимих зернових колосових культур різного стану в Миколаївській області (за даними осінньої 2007 р. зйомки MODIS)



**Рис. 3.** Фрагмент класифікованого зображення у межах південної частини України з виділенням Жовтневого району Миколаївської області (показано стрілкою) за даними осінніх знімків MODIS 2005 р.

мих зернових, що саме проходили фазу кушіння (рис. 2).

Для якісного розділення класів озимих зернових та озимого ріпаку потрібно володіти інформацією і про динаміку індексу NDVI посівів цієї технічної культури. Проте під час поїздки до Миколаївської області виявлено, що на окремих площах розвиток озимого ріпаку різний, і до кожного поля фахівці-аграрії застосовують ін-

дивідуальний підхід. Тому поки що зафіксовано труднощі при спробі скласти належну вибірку посівів озимого ріпаку тотожного стану на території Миколаївської області. Через те під час перевірки у південному регіоні дієвості методики прогнозування врожайності озимих зернових, розробленої на прикладі Київської області, посіви озимих культур нами не розділялись.

### СУПУТНИКОВА ОЦІНКА ПОСІВІВ ОЗИМИХ КУЛЬТУР МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

За офіційними статистичними даними на території Миколаївської області площа озимих зернових під урожай 2006 р. склала 396 тис. га, а площа озимого ріпаку — 10.8 тис. га (2.5 %). На підставі класифікації синтезованого знімка (рис. 3), котрий включав значення індексу NDVI за 6 і 21 жовтня та 5 листопада 2005 р., нами було дистанційно визначено розподіл цих площ в межах адміністративних районів, і отримані дані зіставлено зі статистичними (табл. 3).

Наведені в табл. 3 дані свідчать про досить широкий діапазон відхилення дистанційно визначених площ озимих культур від статистично задекларованих у межах окремих адміністративних районів, хоча у підсумку для всієї території області відсоток відхилень порівняно незначний — 10 % в сторону збільшення. Дана похибка може бути спричинена тим, що класифікація синтезованого осіннього 2005 р. знімка велась на основі знання спектральної динаміки посівів озимих культур Миколаївщини, отриманих у 2007 р.

Далі було зроблено припущення, що приєднання до синтезованого осіннього знімка ще й весняних могло би покращити виділення озимих культур. Для цього створено нове синтезоване зображення значень індексу NDVI, котре крім осінніх знімків 2005 р. включало також знімки за 4 квітня, 2 і 22 травня 2006 р. Але результати класифікації такого знімка продемонстрували, що об'єднання осінніх та весняних знімків дозволяє досить надійно виділяти у межах адміністративних районів площі посівів всіх зернових культур: озимих і ярих разом (табл. 4). Можливо, це пов'язано з тим, що на 22 травня

Таблиця 3. Площа посівів озимих культур (озимі зернові + озимий ріпак) у межах адміністративних районів Миколаївської області під урожай 2006 р. (за даними осінньої зйомки MODIS 2005 р.)

Номер п/п	Район	Усереднена дистанційна оцінка площ посівів озимих культур під урожай 2006 р., га	Збережена площа посівів озимих культур під урожай 2006 р. (за статистичними даними), га	Відхилення площ, визначених дистанційно, від статистично задекларованих, %
1	Арбузинський	18890	22852	-17
2	Баштанський	30046	26744	12
3	Березанський	13706	22557	-39
4	Березнегуватський	28886	23446	23
5	Братський	29718	20163	47
6	Веселинівський	23158	28117	-18
7	Вознесенський	34365	25596	34
8	Врадіївський	13603	12003	13
9	Доманівський	32763	31604	4
10	Єланецький	32351	18524	75
11	Жовтневий	17735	17250	3
12	Казанківський	28279	18547	52
13	Кривоозерський	9956	14332	-31
14	Миколаївський	25625	24734	4
15	Новобузький	17014	12015	42
16	Новоодеський	34821	28381	23
17	Очаківський	10258	10809	-5
18	Первомайський	25317	26513	-5
19	Снігурівський	21708	22930	-5
	Разом	448199	407117	10

Таблиця 4. Площа посівів зернових культур (озимих і ярих) у межах адміністративних районів Миколаївської області під урожай 2006 р. (за даними осінньо-весняної зйомки MODIS 2005–2006 рр.)

Номер п/п	Район	Усереднена дистанційна оцінка площ посівів зернових культур під урожай 2006 р., га (за даними осінньо-весняної зйомки MODIS)	Збережена площа посівів зернових культур під урожай 2006 р., га (за статистичними даними)	Відхилення площ, визначених дистанційно, від статистично задекларованих, %
1	Баштанський	58502	62725	-7
2	Березанський	47278	48603	-3
3	Березнегуватський	47799	47944	0
4	Братський	42474	40360	5
5	Веселинівський	53111	48923	9
6	Вознесенський	59513	45107	32
7	Єланецький	39509	34919	13
8	Жовтневий	52210	53683	-3
9	Казанківський	48694	50066	-3
10	Миколаївський	53133	42060	26
11	Новобузький	39054	42153	-7
12	Новоодеський	51051	47658	7
13	Очаківський	21923	22350	-2
14	Снігурівський	56485	55111	2
	Разом	670736	641662	4.5

**Таблиця 5. Результати кореляційного аналізу для дистанційно визначених та офіційних розмірів площ посівів сільськогосподарських культур**

Посів	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Стандартна похибка коефіцієнта кореляції	Критерій істотності коефіцієнта кореляції
Озима пшениця Київської області, 2007 р.	0.87	0.76	0.11	7.69
Озимі культури Миколаївської області, 2006 р.	0.56	0.31	0.20	2.79
Зернові культури (озимі та ярі) Миколаївської області, 2006 р.	0.79	0.62	0.18	4.46

2006 р. у степовій зоні України ярі зернові, висіяні ще наприкінці березня, досягли фази кінця кушіння — початку трубкування, що супроводжувалось досить високими значеннями проективного покриття посівів, а отже, й швидким наростанням значень їхнього індексу NDVI. Відсутність у табл. 4 п'яти районів Миколаївської області пояснюється тим, що вони на окремих знімках були вкриті хмарами, тому й не брались до уваги під час визначення розмірів площ.

Як бачимо, найбільше відхилення (+32 % для Вознесенського району) дистанційно визначених площ зернових культур від статистично задекларованих при класифікації цього знімка суттєво менше від максимального відхилення при класифікації осіннього знімка для визначення озимих культур (табл. 3, +75 % для Єланецького району). Тобто, процедура узагальнення розмірів площ всіх зернових культур призвела до отримання менших відхилень від фактичних значень. Зіставлення сумарних дистанційно визначених і статистично задекларованих площ зернових у межах області теж свідчить про досить добру збіжність результатів (+4.5 %).

Коефіцієнти кореляції між масивами дистанційно визначених площ та даними державної статистики істотні в усіх трьох проаналізованих випадках (табл. 5).

Порівняння розрахованого фактичного значення критерію істинності коефіцієнту кореляції зі стандартними значеннями критерію Стьюдента [3] засвідчило, що кореляційний зв'язок між дистанційно визначеними і статистичними даними розмірів площ посівів озимих культур у межах адміністративних районів Миколаївської області під урожай 2006 р. істотний на 5 % рівні

значимості, а в двох інших випадках — на 0.1 % рівні значимості.

Отримані дані узгоджуються із результатами робіт С. Барталева зі співавторами [2], котрі відзначали, що незважаючи на високі значення коефіцієнтів кореляції, абсолютні відмінності між дистанційно визначеними розмірами площ різних типів посівів сільськогосподарських культур та відповідними даними державної статистики можуть бути досить значними. Натомість зіставлення дистанційно визначених площ всіх орних земель зі статистичними даними свідчить про їхню добру відповідність.

Таким чином, супутниковий моніторинг посівів озимих культур необхідно розпочинати з моменту появи сходів цих культур, тобто, в осінній період. Використання знімків зі системи TERRA/MODIS дозволяє не лише виявити різний стан розвитку озимих зернових, але й визначити розміри площ цих культур в межах адміністративних районів.

## ВИСНОВКИ

1. Математично достовірні відмінності значень індексу NDVI між різними за станом посівами озимих зернових Миколаївської області виявлено на дату 6 листопада 2007 р., коли рослини озимих зернових перебували у фазі кушіння.

2. Відхилення дистанційно визначених розмірів площ посівів озимих зернових від статистичних даних в межах адміністративних районів як Київської, так і Миколаївської областей коливається в досить широкому діапазоні (від +75 % до -39 %), проте в цілому для області становить близько 10 %. Кореляційний зв'язок між дистанційно визначеними і статистичними да-

ними є істотним (рівень значимості 5–0.1 %) для усіх проаналізованих масивів даних.

3. Дистанційне визначення загальної площі ярих і озимих зернових Миколаївської області за допомогою різночасових осінньо-весняних 2005–2006 рр. знімків MODIS зменшує різницю між дистанційними і статистичними даними майже вдвічі — до 5 %.

1. *Барталев С. А., Бурцев М. А., Еришов Д. В. и др.* Система автоматизированного сбора, обработки и распространения спутниковых данных для мониторинга сельскохозяйственных земель // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. статей.* — М.: GRANP polygraph, 2005. — Том 1. — С. 140–148.
2. *Барталев С. А., Луян Е. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // *Исслед. Земли из космоса.* — 2006. — № 3. — С. 68–75.
3. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — М.: Колос, 1968. — 336 с.
4. *Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Греков Л. Д.* Контроль площ та стану озимих культур за допомогою знімків MODIS/TERRA та SPOT XI (на прикладі Київської області) // *Доп. НАН України.* — 2007. — № 3. — С. 122–127.
5. *Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Греков Л. Д.* Оцінка площі посівів озимих культур в межах адміністративних районів Київської області під урожай 2007 року за допомогою знімків MODIS // *Матеріали регіональної наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем Київщини».* — Київ, 2007. — С. 19.
6. *Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Греков Л. Д.* Дистанційна оцінка площ озимого клину Київської

області під урожай поточного 2007 року // *Матер. Першої наук. Конф. «Науки про Землю та Космос — Суспільству», Київ, 25–27 червня 2007 р.* — Київ, 2007. — Р. 5.2

7. *Посівні площі сільськогосподарських культур під урожай 2007 року в господарствах Київської області.* Статистичний бюлетень. — К.: Головне управління статистики у Київській області, 2007. — 49 с.
8. *Султангазин У. М., Муратова Н. Р., Терехов А. Г.* Использование космического мониторинга для планирования и прогнозирования зернового производства // *Труды первой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 10–12 ноября 2003 г.: Сб. науч. статей.* — М., 2003. — С. 279–285 ([www.iki.rssi.ru/earth/trudi/1-28.pdf](http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/1-28.pdf))
9. *Sultangazin U., Muratova N., Terekhov A.* Monitoring and assessment of spring crops in Kazakhstan // *Agro-meteorological Monitoring in Russia and Central Asian Countries / Eds I. Savin, T. Negre.* — EUR 22210. 2006. — P. 85–104.

Надійшла до редакції 13.08.09

*O. I. Sakhatsky, G. M. Zholobak, H. A. Makarova,  
O. A. Apostolov, M. V. Yushchenko*

#### LAND COVER CLASSIFICATION FOR THE MONITORING OF WINTER GRAIN CROPS WITHIN THE KYIV OBLAST AND MYKOLAIV OBLAST (UKRAINE) WITH THE USE OF MODIS DATA

We consider some results of multitemporal MODIS data processing to evaluate the winter grain crop areas within the Kyiv and Mykolaiv oblasts, Ukraine. The remotely identified winter grain crop areas differ from the statistical data within the individual administrative districts. This deviation is varied over a wide range, and yet it is about 10 % as a whole. It is found that the NDVI value during November 2007 and its sum for the autumn vegetation period in 2007 are reliably distinct for different states of winter grain crops within the Mykolayiv oblast.

УДК 621.396.06

**М. В. Белоброва<sup>1</sup>, А. Г. Боев<sup>2</sup>, А. В. Кабанов<sup>3</sup>, А. Я. Матвеев<sup>3</sup>, В. Н. Цымбал<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків

<sup>2</sup> Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

<sup>3</sup> Центр радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Харків

## **ОПЕРАТИВНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

---

*Описано реалізацію методу оперативного складання мап нафтових забруднень морської поверхні безпосередньо на борту літака при проведенні синхронної двохчастотної радіолокаційної зйомки. Розроблено алгоритми і програмне забезпечення для бортової обробки результатів зйомки, що дозволяють оперативно оцінювати товщину нафтової плівки у кожному пікселі зображення району, що досліджується, складати мапу розподілу товщин плівки по всьому зображенню і, за вказівкою оператора, оцінювати кількість нафти як на окремій ділянці, так і на всьому зображенні. Метод ґрунтується на порівнянні теоретичних і експериментальних радіолокаційних контрастів забрудненої нафтою морської поверхні. Він використаний для складання мапи розподілу товщини нафтової плівки в акваторії району видобування нафти «Нафтові Каміні» у Каспійському морі за результатами обробки двох радіолокаційних зображень (довжина хвиль  $\lambda_1 = 3$  см,  $\lambda_2 = 23$  см), отриманих за допомогою авіаційного багаточастотного радіолокаційного комплексу МАРС. Аналіз результатів картографування показав, що товщина нафтової плівки по акваторії змінювалася у межах 0.01–3 мм, а сумарна маса розлитої нафти сягала 44000 т. Аналіз дозволив виявити найбільш забруднені ділянки акваторії та оцінити на них кількість розлитої нафти.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время во всем мире интенсивно ведется разработка и запуск систем дистанционного зондирования Земли, которые ориентированы на широкое и эффективное практическое использование [16]. С учетом растущего количества катастрофических явлений природного и антропогенного происхождения (ураганы, наводнения, аварийные разливы нефти и проч.) [16, 24] приоритетным направлением является создание оперативных радиолокационных систем по предупреждению таких явлений. Их использование невозможно без разработки методов зондирования, обработки и интерпретации полученной информации, которая непосредственно связана с

особенностью рассеяния радиоволн различными видами земной поверхности.

Разработка дистанционных методов диагностики катастрофических явлений является многопараметрической задачей, для решения которой привлекаются данные различных систем зондирования (комплексные методы), данные синхронного зондирования на нескольких частотах (многочастотные методы) или поляризациях (многополяризационные методы).

Первые количественные оценки толщины нефтяных пленок на морской поверхности были получены комплексированием данных радиометрических и радиолокационных систем [19, 23]. При этом обнаружение нефтяных пятен и оценка их размеров осуществлялись радиолокатором, а измерение толщины пленки проводилось по радиометрическим данным. Поскольку оперативность такого комплексного метода за-

висит от погодных условий, то более перспективным является использование радиолокационных методов. Несмотря на достаточно давнее использование радиолокационных систем для обнаружения нефтяных загрязнений и их источников [1, 8, 11, 12, 14, 16, 17, 20, 21, 23], достоверные радиолокационные оценки толщины пленки и объемов разлитой нефти стали возможными только после создания многочастотного радиолокационного метода диагностики нефтяных загрязнений [3—7, 15, 16, 18] на основе теории гашения морской волны пленками ПАВ [3, 9, 10].

### МНОГочАСТОТНЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Суть метода заключается в сравнении теоретических и экспериментальных радиолокационных контрастов загрязненной нефтью морской поверхности, полученных по результатам синхронных измерений на двух длинах волн.

Величина экспериментального радиолокационного контраста  $D_E(k_E)$  определялась как

$$D_E(k_E) = 10 \lg \left\{ \frac{V_r^2 - V_N^2}{V_S^2 - V_N^2} \right\}, \quad \text{[дБ]}, \quad (1)$$

где  $k_E$  — волновое число радиоволны,  $V_r = \sqrt{U_r^2 + U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды сигнала, который принят от загрязненного участка морской поверхности,  $V_S = \sqrt{U_S^2 + U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды сигнала, который принят от чистой морской поверхности,  $V_N = \sqrt{U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды шумов приемника радиолокатора,  $U_r$ ,  $U_S$ ,  $U_n$  — амплитуды соответствующих сигналов на выходе блока обработки сигналов (БОС). Отметим, что использование величины радиолокационного контраста  $D_E(k_E)$  в качестве сравнительной характеристики рассеяния морской поверхности на различных частотах позволяет исключить из рассмотрения ряд важных переменных парамет-

ров (ветровая зависимость интенсивности рассеяния радиоволн морской поверхностью, стабильность параметров аппаратуры, различия в обработке информации РСА и РБО и др.)

Теоретические радиолокационные контрасты  $D_h(k, h)$  рассчитывались в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [9, 10]. Контраст  $D_h(k, h)$  морского волнения под пленкой ПАВ конечной толщины  $h$  записывается в виде

$$D_h(k, h) = -10 \lg \frac{\omega_0(k)^2 \gamma_0(k)^2}{\omega_+(k)^2 \gamma(k)^2}, \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_L + \frac{kh}{2} Q(k), \quad Q(k) = S_1 + S_2 - S_3,$$

$$k = 2k_E \sin \theta.$$

Здесь  $\omega_0 = \sqrt{gk + \alpha k^3} / \rho$ ,  $\omega_+ = \sqrt{gk + (\alpha + \alpha_1)k^3} / \rho$  соответственно частоты поверхностных волн на чистой и покрытой пленкой морской поверхности,  $k$  — волновое число морской волны,  $g = 981 \text{ см/с}^2$ ,  $\alpha$  и  $\alpha_1$  — коэффициенты поверхностного натяжения на границе вода — пленка и пленка — воздух,  $\rho$  — плотность воды;  $\theta$  — угол падения радиоволны на морскую поверхность. В формулах (2) выражение

$$\gamma_L = \gamma_0 \left[ \frac{1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)^{3/2}}{1 - 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)} \right] \quad (3)$$

— коэффициент затухания Левича [13],  $\gamma_0 = 2\nu k^2$  — коэффициент вязкого затухания поверхностной волны,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды,  $\omega_{C1} = \sqrt{\alpha_1 k^3} / \rho$  — частота капиллярных поверхностных волн,  $\gamma_S = p\omega_{C1}^2 / \omega_0$  — силовой параметр, характеризующий влияние растяжения пленки на волну,  $p = (c_0 / \alpha_1)(d\alpha_1 / dc)$  — безразмерная поверхностная активность (упругость) пленки (в дальнейшем активность),  $c_0$  — невозмущенная концентрация пленки ПАВ.

Величины  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  в формуле (2) определяются выражениями

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{\gamma_g}{\omega_+} \left( 1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \right) \times \\
 &\times \left\{ \frac{\rho_1}{\rho} \left[ \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \left( \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right) - 2 \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} \frac{\gamma_g}{\gamma_{01}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right) \right] - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right\} \times \\
 &\times \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)^{-1} - \frac{\rho_1 \gamma_{01}}{\rho \omega_+}, \\
 S_2 &= \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \times \\
 &\times \left[ 1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} + 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} - \frac{\rho_1}{\rho} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right] \times \\
 &\times \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)^{-1}, \\
 S_3 &= \sqrt{\frac{v}{v_1}} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \times \\
 &\times \left[ -1 + 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right] \times \\
 &\times \left[ \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 + 4 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \right]^{-1}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $\gamma_g = (\rho_1/\rho)\gamma_s$ ,  $\gamma_{01} = 2v_1 k^2$  — коэффициент вязкого затухания поверхностной волны в нефти. В формулах (2)–(4) содержится пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное натяжение, вязкость нефти и ее плотность. При наличии достаточно большого массива экспериментальных данных принципиально возможно составить пять независимых уравнений, и решить их относительно всех этих параметров. Отметим, что в случае зондирования акватории, загрязненной нефтью с заранее известными вязкостью, поверхностным натяжением и плотностью, для определения остальных двух неизвестных параметров (активности  $p$  и толщины  $h$ ) достаточно составить и решить два уравнения с использованием данных эксперимента, например, на сантиметровых и дециметровых радиоволнах:

$$D_E(k_c) = D_0(k_c) + 20 \lg \left[ 1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_c h Q(k_c) \right], \tag{5}$$

$$D_E(k_d) = D_0(k_d) + 20 \lg \left[ 1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_d h Q(k_d) \right]. \tag{6}$$

Здесь  $k_c$  и  $k_d$  — волновые числа сантиметровых и дециметровых поверхностных волн, определяемые для одного и того же угла падения радиоволн  $\theta$ ,  $D_E(k_c)$ ,  $D_E(k_d)$  — соответствующие им экспериментальные значения радиолокационных контрастов,  $D_0(k_c)$ ,  $D_0(k_d)$  — теоретические значения контрастов из выражения (2) при  $h = 0$ .

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Необходимо подчеркнуть, что реализация такого метода должна выполняться под конкретный авиационный комплекс дистанционного зондирования с учетом технических возможностей самолета и характеристик радиолокационных систем.

Рассмотрим обобщенный вариант оперативного двух частотного метода, реализованного под авиационный многоцелевой радиолокационный комплекс МАРС [12, 16], на котором в 1989–1991 гг. в акватории каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» проводилась апробация предложенного метода. Комплекс МАРС был установлен на борту самолета ИЛ-18Д. В его состав входили два радиолокатора бокового обзора с реальной апертурой антенн (РБО-08,  $\lambda = 0.8$  см и РБО-3,  $\lambda = 3$  см) и два радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА-23,  $\lambda = 23$  см и РСА-180,  $\lambda = 180$  см).

Реализация метода была разделена на три этапа:

- получение и предварительная обработка экспериментальных данных;
- определение экспериментальных контрастов и расчет толщины нефтяной пленки;
- оценка площади нефтяного загрязнения и количества разлитой на морской поверхности нефти.

**Получение и предварительная обработка экспериментальных данных.** Как видно из выражения (1), для оценки радиолокационных контрастов  $D_E(k_E)$  загрязненных участков морской поверхности необходимо получить в цифровом виде их совмещенные см- и дм-изображения и опреде-

лить в полосе обзора изменение значений сигналов, отраженных от чистого моря, и шумов приемников. Кроме того, поскольку падающая на морскую поверхность под углом  $\theta$  радиоволна и поверхностная волна связаны соотношением  $k = 2k_E \sin \theta$ , для оценок толщин нефтяных пленок по формулам (5) и (6) необходимо определить значения углов  $\theta$  для каждого пикселя изображения в полосе обзора.

Для получения указанной информации была использована следующая апробированная методика съемки загрязненных участков морской поверхности. Сначала выполнялся поиск и обнаружение загрязненных нефтью участков, оценивались их размеры и возможный источник загрязнения, уточнялись режимы съемки. В перерывах между съемками или на разворотах самолета выполнялась внутренняя калибровка радиолокаторов (записывались уровень собственных шумов приемников, форма кривой временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) приемного тракта и др.). Затем выполнялась контрольная съемка в оптимальных режимах.

Самолет Ил-18Д обеспечивал радиолокационную съемку с высоты 7000—7500 м при скорости 400—500 км/ч. При этом выполнялись одновременное зондирование радиолокаторами РБО-3 и РСА-23 (поляризация вертикальная на прием и передачу сигналов) в полосе около 30 км и оперативная обработка в реальном времени принятой информации. Принятые радиосигналы см- и дм-диапазонов обрабатывались независимо, но синхронно, блоками обработки сигналов — БОС РБО-3 и БОС РСА-23. Обработанная с их помощью рабочая информация имеет вид набора строк радиолокационных изображений см-, дм-диапазонов. Первые 512 байт в каждой строке заняты служебной информацией. К ней относятся: служебные параметры записи данной информации, время и дата создания файла, место съемки, диапазон частот, высота и скорость полета, углы сноса, крена, тангажа и географические координаты самолета. Время обновления координат составляло 0.5—1 с и зависело от выбора режима работы приемника GPS. Данные о калибровке радиолокаторов записывались в информационной части строки

каждого из них. Во время съемок на самолете велся журнал наблюдений, в который вносились данные о состоянии атмосферы, морской поверхности (как по визуальными наблюдениям, так и по данным метеостанций, ближайших к району исследований), описание визуально наблюдаемых явлений и др.

На рис. 1, а показаны изображения, полученные по результатам контрольной съемки на выходах БОС РБО-3 и БОС РСА-23 комплекса МАРС (первичная информация) Те же изображения после предварительной обработки приведены на рис. 1, б. Видно, что первичное формирование информационной части строки изображения блоками БОС РБО-3 и БОС РСА-23 имеет свои особенности. Если БОС РБО-3 вел запись и обработку см-сигналов с момента запуска передатчика РБО-3, то запись и обработка дм-сигналов велась БОС РСА-23 с начальной задержкой (50—60 мкс), которая определялась высотой полета самолета и начальным углом обзора. При этом полоса обзора РСА-23 составляла около 30 км. Полное геометрическое совпадение см- и дм-изображений возможно только при движении самолета строго вдоль и против направления ветра. Это объясняется тем, что антенна РБО-3 жестко фиксирована вдоль фюзеляжа самолета и формирует см-изображение в перпендикулярном к нему направлении, а РСА-изображение формируется в направлении, которое перпендикулярно к линии полета самолета. При наличии бокового ветра эти направления не совпадают, в связи с чем возникают геометрические искажения см-изображения, которые корректируются с помощью стандартных графических редакторов. Наличие в изображениях ярких точек и линий, источниками которых являются нефтедобывающие вышки и эстакады между ними, дает возможность с высокой точностью совместить см- и дм-изображения.

Строки шумов приемников записывались на этапе подготовки контрольной съемки. Строки амплитуд сигналов  $V_S$ , соответствующие отражению от чистого моря, выделялись из изображения исследуемого участка. Оценка угла падения  $\theta_n$  для каждого пикселя строки файлов шу-

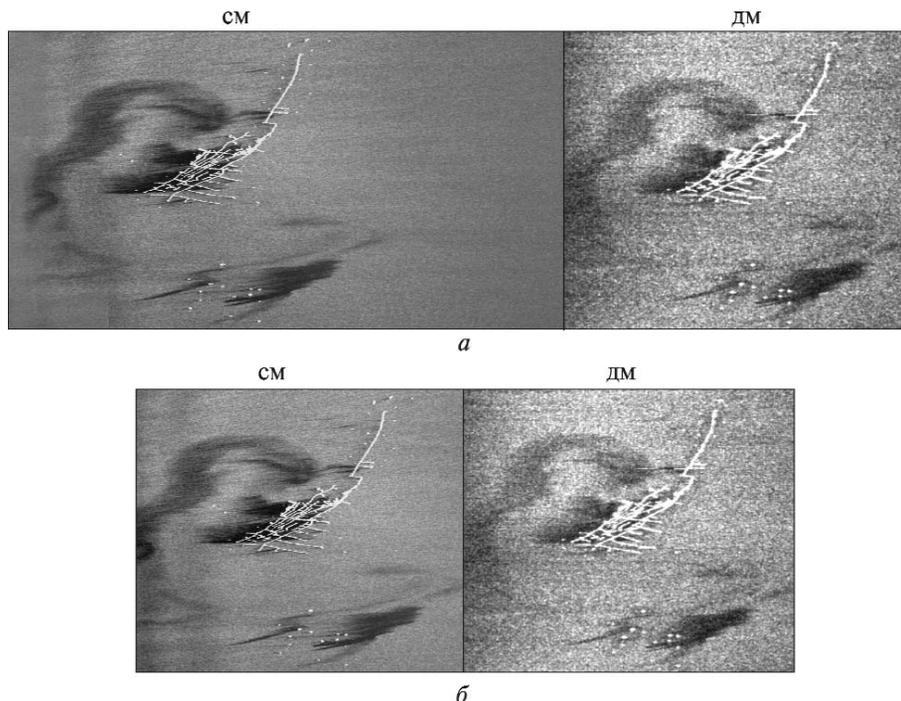


Рис. 1. Примеры см- и дм-изображений, полученных с помощью комплекса МАРС: а — первичные изображения, б — изображения после предварительной обработки

ма приемника, изображений загрязненного и чистого моря выполнялась по формуле

$$\theta_n = \arccos \left[ \frac{2H}{c(\tau_{\text{зад}} + An)} \right], \quad (7)$$

$$A = \frac{2(R_2 - R_1)}{cN}.$$

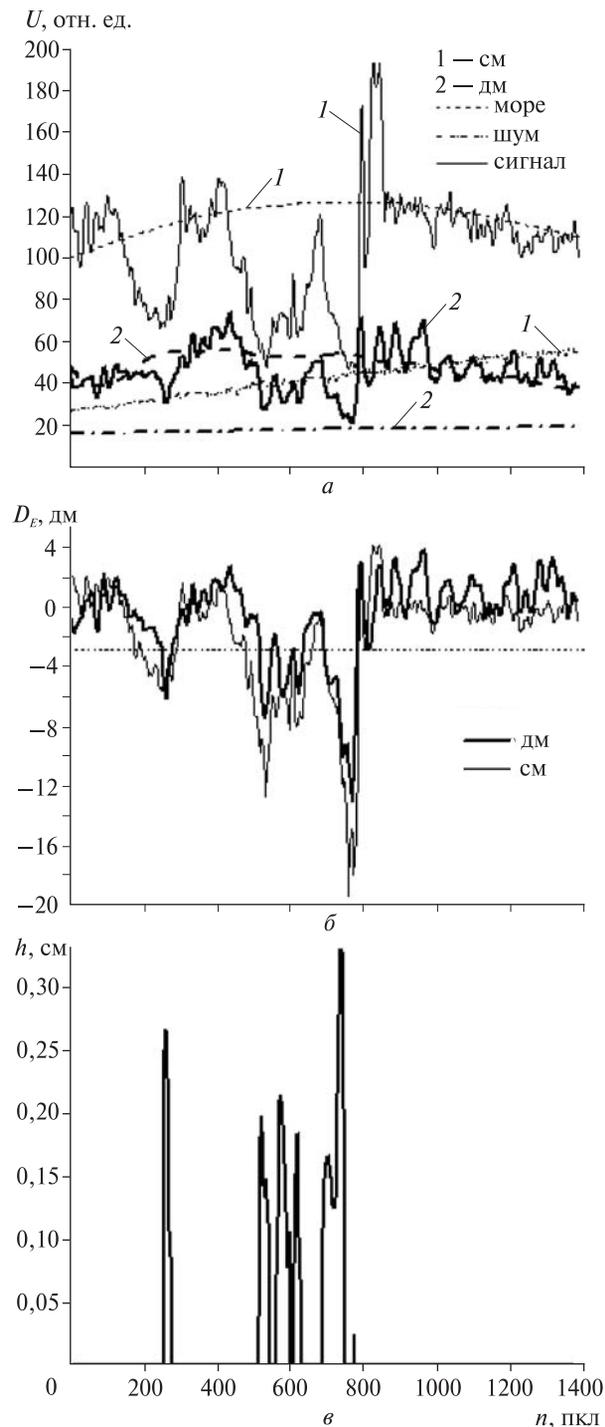
Здесь  $H$  — высота полета самолета,  $n$  — номер пикселя в строке обрабатываемого изображения ( $n = 1, 2, \dots, N$ ),  $\tau_{\text{зад}}$  — время, за которое излученный радиоимпульс, отразившись от начала полосы обзора исследуемой морской поверхности, поступит на вход приемника радиолокатора,  $R_1$  и  $R_2$  — расстояния от фазового центра приемо-передающей антенны радиолокатора до начала и конца полосы обзора морской поверхности, соответственно (наклонные дальности),  $c$  — скорость света.

**Определение экспериментальных контрастов и расчет толщины нефтяной пленки.** Анализируемые изображения (рис. 1) состоят из 922 строк (счет сверху вниз) длиной 1380 пкл. Чистому мо-

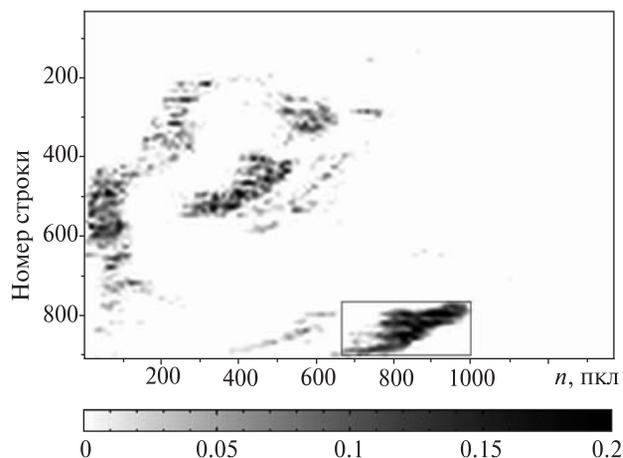
рю отвечает 40-я строка изображений. Строки шумов приемников вырезаются из калибровочных файлов, записанных перед контрольной съемкой. Строки пары изображений могут обрабатываться как последовательно с 1-й по 922-ю (для получения карты), так и выборочно (для получения оперативных данных по конкретному участку во время съемки). Все строки изображений и шума сглажены кубическими сплайнами [22].

Для расчетов использовались известные значения параметров нефти, добываемой на нефтепромысле «Нефтяные Камни» [6, 7, 10, 16]: коэффициенты поверхностного натяжения на границе раздела вода — нефть и воздух — нефть соответственно  $\alpha = 13$  дин/см и  $\alpha_1 = 60$  дин/см; коэффициенты кинематической вязкости воды и нефти —  $\nu = 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с и  $\nu_1 = 0.3$  см<sup>2</sup>/с; плотность воды  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, плотность нефти —  $\rho_1 = 0.8$  г/см<sup>3</sup>. Расчеты неизвестных значений активности  $p$  и толщины  $h$  проводились по формулам (5) и (6). Блок-схема алгоритма решения задачи и построения карты распределения толщин пленки по акватории показана на рис. 2.

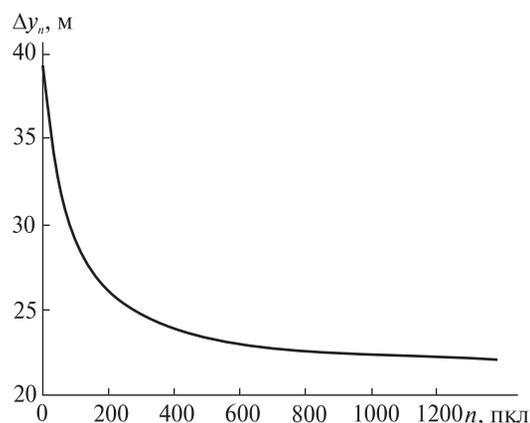




**Рис. 3.** Оценки параметров нефтяной пленки для 290-й строки см- и дм-изображений: *a* — сглаженные значения амплитуд отраженных от загрязненной и незагрязненной поверхности моря сигналов и шума, *б* — экспериментальные значения контрастов, *в* — значения толщины пленки



**Рис. 4.** Карта распределения толщин нефтяной пленки по акватории нефтедобывающего района «Нефтяные Камни» в Каспийском море



**Рис. 5.** Зависимость поперечного размера пикселя  $\Delta y_n$  его номера вдоль строки изображения

На рис. 3 приведен пример расчета толщины пленки для 290-й строки изображений. На рис. 3, *a* показаны сглаженные значения амплитуд отраженных от загрязненной и незагрязненной поверхности моря сигналов и шума приемника в строке РЛ-изображения. На рис. 3, *б* представлены экспериментальные значения контрастов. На рис. 3, *в* показаны значения толщины пленки, рассчитанные для экспериментальных контрастов, меньших  $-3$  дБ, — порога, определяемого условиями предварительной обработки сигналов. Видно, что большим по модулю значениям контрастов отвечают большие значения толщи-

ны нефтяной пленки. Карта распределения толщин нефтяной пленки по акватории месторождения показана на рис. 4. Квадратом выделен участок, для которого далее будет приведена оценка количества разлитой нефти.

**Оценка площади нефтяного загрязнения и количества разлитой на морской поверхности нефти** является конечным этапом мониторинга, после которого принимается решение о необходимости организации мероприятий по оперативному устранению опасных для окружающей среды разливов поверхностно-активных веществ. На основе карты толщин (рис. 4), которая дает информацию о толщине пленки в каждом пикселе изображения, площадь  $S_{nl}$  загрязненного участка и масса  $M$  разлитой нефти определялись по формулам

$$S_{nl} = \sum_{n=a}^b \sum_{l=c}^d (\Delta x \Delta y_n), \quad (8)$$

$$M = \sum_{n=a}^b \sum_{l=c}^d (\Delta x \Delta y_n) h_{nl} \rho. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta x$  и  $\Delta y_n$  — геометрические проекции на горизонтальную плоскость размеров пикселя вдоль и поперек направления движения самолета соответственно,  $n$  — номер пикселя в строке изображения,  $l$  — номер строки,  $h_{nl}$  — толщина пленки нефти в выбранном пикселе,  $\rho$  — плотность нефти.

В комплексе МАРС блоки обработки сигналов РБО-3 и РСА-23 формируют на своих выходах строки изображения с частотой  $F = 0.25$  Гц. Поэтому при неизменной скорости самолета  $V$  во время съемки размер каждого пикселя вдоль направления полета одинаковый и равняется  $\Delta x = V \cdot F$ . Для использованной контрольной съемки  $\Delta x = 445 \text{ км/ч} \cdot 0.25 \text{ Гц} = 30.9 \text{ м}$ .

Размер пикселя  $\Delta y_n$  с учетом (7) составлял

$$\Delta y_n = R_{n+1} \sin \theta_{n+1} - R_n \sin \theta_n, \quad (10)$$

$$n = 1, 2, \dots, 1380,$$

где  $R_n, R_{n+1}$  — наклонные дальности до конца  $n$ -го и  $n+1$ -го пикселя строки изображения. Зависимость размера пикселя  $\Delta y_n$  от номера  $n$  для анализируемой пары изображений показана на рис. 5.

В соответствии с формулами (8)—(10) было разработано программное обеспечение для оценки объема и количества нефти по карте распределения толщины пленки. Расчеты показали, что масса нефти на поверхности в участке изображения, которая обозначена на рис. 4 черным прямоугольником, равняется 11509 т. Суммарная же масса нефти, разлитой на всей акватории, составила 43925 т. Ошибки определения количества нефти при данной аппаратурной реализации метода составляют 15—20 %. Точность измерений толщины нефтяной пленки [3—7, 15, 16, 18] подтверждается данными радиометрических измерений [23], проведенных в том же районе.

## ВЫВОДЫ

Описанный метод и его аппаратурная реализация обеспечивают возможность получения оперативной информации о количестве разлитой на морской поверхности нефти с ошибкой 15—20 %. Метод прошел апробацию на авиационном радиолокационном многочастотном комплексе МАРС. Результаты, полученные с помощью комплекса при зондировании акватории месторождения «Нефтяные Камни» в Каспийском море, подтверждены данными, полученными в том же районе радиометрическим методом. Разработанное программное обеспечение метода позволяет в реальном времени строить карты распределения толщин нефтяных загрязнений морской поверхности и получать количественные данные о массе разлитой нефти непосредственно во время полета. Предложенный метод может быть использован также и на других авиационных радиолокационных комплексах. Космическое применение метода также возможно при синхронном РЛ-зондировании с КА на различных длинах волн, например с КА RADARSAT-1,2 или ENVISAT ( $\lambda = 6 \text{ см}$ ) и КА Terra SAR-X или COSMO-SkyMed-1,2 ( $\lambda = 3 \text{ см}$ ) [[http://directory.eoportal.org/missions\\_all\\_list.php?&view\\_all](http://directory.eoportal.org/missions_all_list.php?&view_all)].

1. Белоброва М. В., Боев А. Г., Иванов В. К. и др. Результаты многочастотного радиолокационного монито-

- ринга неоднородностей волнения морской поверхности // *Космічна наука і технологія*. — 2002. — **8**, № 2/3. — С. 275—278.
2. Боев А. Г., Карвицкий Г. Э. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 1997. — **2**, № 3. — С. 281—291.
3. Боев А. Г., Карвицкий Г. Э., Матвеев А. Я., Цымбал В. Н. Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 1998. — **3**, № 1. — С. 43—48.
4. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационная диагностика аварийного разлива нефти в акватории Каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» // Третья открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 14—17 ноября, 2005, г. Москва. — М., 2005. — С. 157.
5. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационный мониторинг аварийного разлива нефти в акватории Каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» // Международная научно-практическая конференция «Сучасні технології управління екологічною та інформаційною безпекою території», 5—9 сентября, 2005, п. Рыбачий, АР Крым. — С. 138—139.
6. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2005. — **10**, № 2. — С. 178—188.
7. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // *Исслед. Земли из космоса*. — 2008. — № 5. — С. 29—36.
8. Боев А. Г., Матвеев А. Я., Цымбал В. Н. Опыт оперативного мониторинга загрязненной нефтепродуктами морской поверхности радиолокационными средствами ДЗЗ аэрокосмического базирования // Матеріали регіональної наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем причорноморського регіону», 11—14 листопада 2003 р., Одеса, Україна. — Одеса, 2003. — С. 65—67.
9. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой поверхностно-активного вещества конечной гидродинамической толщины // *Прикладна гідромеханіка*. — 2002. — **4**, № 4. — С. 14—22.
10. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины // *Изв. РАН. ФАО*. — 2003. — **39**, № 1. — С. 132—141.
11. Галаев Ю. М., Калмыков А. И., Курекин А. С. и др. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // *Изв. АН СССР. ФАО*. — 1977. — **13**, № 4. — С. 406—414.
12. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли MAPC // *Радиофизика и Радиоастрономия*. — 1998. — **3**, № 2. — С. 119—129.
13. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: ГИТТЛ, 1959. — 669 с.
14. Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. и др. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // *Исслед. Земли из космоса*. — 2007. — № 1. — С. 81—94.
15. Матвеев А. Я., Боев А. Г. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // Матеріали міжнародної наукової конференції «Достижения в спутниковой океанографии: изучение и мониторинг окраинных морей Азии», 3—6 октября, 2007, Владивосток. — Владивосток, 2007. — Р. 83—85.
16. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / Под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. — К.: НАН Украины, 2007. — 439 с.
17. Belobrova M. V., Boev A. G., Ivanov V. K., et al. Experimental multifrequency investigations into the sea surface roughness inhomogeneities through the use of the MARS radar system // *Proc. 4-th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2002: 4—6 June 2002*. — Cologne (Germany). — VDE VERLAG GMBH \*Berlin\* Offenbach. — P. 733—736.
18. Boyev A. G., Karvitsky G. E., Matveyev A. Ya., Tsybmal V. N. Evaluation of oil film parameters on the sea surface using multifrequency radar data // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 1997. — **51**, N 8. — P. 4—12.
19. Grüner K., Reuter R., Smid H. A new sensor system for airborne measurements of maritime pollution and hydrographic parameters // *GeoJournal*. — 1991. — **24**, N 1. — P. 103—117.
20. Krishen K. Detection of oil spills using a 13.3-GHz radar scatterometer // *J. Geophys. Res.* — 1973. — **78**, N 12. — P. 1952—1963.
21. Pilon R. O., Purves C. G. Radar imagery of oil slicks // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* — 1973. — **AES-9**, N 5. — P. 630—636.
22. Reinsh C. H. Smoothing by spline functions // *Numer. Math.* — 1967. — **10**. — P. 177—183.
23. Sharkov E. A. Passive microwave remote sensing of the Earth. Physical foundations. — Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd, 2003. — 611 p.
24. Vimont D. J., Kossin J. P. The atlantic meridional mode and hurricane activity // *Geophys. Res. Letters*. — 2007. — **34**. — P. 1—5 (L07709, doi:10.1029/2007GL029683).

Надійшла до редакції 12.05.09

*M. V. Belobrova, A. G. Boyev,  
A. V. Kabanov, O. Ya. Matvuyev, V. N. Tsybal*

**ON-LINE MAP-MAKING  
AND DIAGNOSTICS OF OIL POLLUTIONS  
OF THE SEA SURFACE USING  
MULTIFREQUENCY RADAR DATA**

The realization of the method for on-line map construction of oil contaminations of sea surface is described. The method allows one to construct map directly aboard an airplane during the synchronous two-frequency radar surveying. The algorithms and software for onboard processing of surveying results are developed. They allow one to estimate operative-ly the film thickness in every pixel of radar images, to plot the map for the distribution of the oil film thicknesses on the

overall image and, at the direction of the operator, to estimate the amount of the spilled oil, both on a separate area and on the overall image. The method is based on the comparison of theoretical and experimental radar contrasts of oil-polluted sea surface. It was used for the map-making of oil film thickness distribution in the oil-producing area «Neftyanie Kamni» in the Caspian Sea. The maps were constructed using the processing results of two X- and L-band radar images which were obtained with the airborne multi-frequency radar complex MARS. The mapping analysis showed that the film thickness on the oil-producing area changed from 0.01 mm to 3 mm and the total mass of the spilled oil was about 44000 tons. The analysis enabled us to find the most polluted water areas and to estimate the amount of the oil spilled there.

УДК 520.16+523.31+523.9:520.86, 550.388

Д. В. Котов<sup>1</sup>, В. А. Пуляев<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИОННОГО СОСТАВА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 1 АВГУСТА 2008 г.

---

*Представлено результати спостережень поведінки іонного складу в зовнішній іоносфері під час часткового затемнення Сонця 1 серпня 2008 р. (фаза 0.42). Вимірювання виконано за допомогою радара некогерентного розсіяння поблизу м. Харкова. Виявлено, що під час головної фази відносний вміст іонів водню збільшувався на висотах 450–650 км до 50 % у порівнянні з контрольним днем. Початок збільшення величини відносного вмісту іонів водню був різним на різних висотах, а вище 560 км зростання випереджало початок затемнення над пунктом спостережень. Висунуто припущення, що цей ефект міг бути обумовлений тим, що 1 серпня 2008 р. місячна тінь наближалася до пункту спостережень з півночі.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Отклики ионосферы на солнечные затмения (СЗ) изучаются достаточно давно и успешно. Несмотря на это, их исследование по-прежнему остается актуальной задачей. Это связано с тем, что реакция среды существенно зависит от фазы в цикле солнечной активности, состояния космической погоды, времени суток, географического расположения обсерватории и т. п. Указанные факторы усложняют решение задач моделирования и предсказания поведения основных параметров ионосферной плазмы в течение СЗ для конкретных гелиогеофизических условий.

Самым информативным из методов диагностики процессов в ионосфере является метод некогерентного рассеяния (НР), который применяется для исследования эффектов СЗ с середины 1960-х гг. [16–18, 21]. Преимущества этого метода подтверждались и в дальнейшем [19, 20]. Из дистанционных методов радиозондирования ионосферы только метод НР позволяет исследовать временные вариации ионного состава.

Харьковский радар НР также систематически используется для наблюдения процессов в

ионосфере, сопровождающих СЗ [1–3, 5–9, 12]. В этих работах изучена реакция на СЗ 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г., которые имели место над Харьковом. Показано, что затмение приводит к уменьшению концентрации электронов  $N$ , температур электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ , изменению направления и величины вертикальной составляющей скорости  $V$  движения плазмы, ионного состава, потоков частиц из ионосферы в плазмосферу и в обратном направлении, потоков тепла, подводимой к электронному газу энергии, скорости амбиполярной диффузии и т. п. Кроме регулярных параметров плазмы, изменяются также параметры волновых процессов в ионосфере [6–7].

Особенностью СЗ 1 августа 2008 г. было то, что оно имело место в период глубокого минимума солнечной активности. Максимальное значение  $N$  не превышало  $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , а высота максимума ионизации — 195 км.

Целью работы является описание результатов экспериментальных исследований ионного состава во внешней ионосфере в период частного СЗ 1 августа 2008 г. (фаза около 0.42) вблизи г. Харькова. Сведения о поведении ионного состава получены с помощью метода НР.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЕЧНОМ ЗАТМЕНИИ

Солнечное затмение началось в 08:04 (здесь и далее мировое время) в северной части Канады, а закончилось в 12:38 в Китае. Ширина полностью затененной области составляла 237 км, а скорость ее движения — около 900 м/с. Максимальное по продолжительности полное затмение имело место в 10:21.

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) покрытие диаметра диска Солнца достигало 0.42. При этом максимальная затененная площадь диска составляла около 31.1 %. СЗ началось в 09:11, а закончилось в 11:17, главная фаза имела место в 10:15. Максимальное значение функции покрытия  $A(t)$  диска Солнца (в момент главной фазы) было равно 0.311, а минимальное значение функции светимости  $B(t) = 1 - A(t)$  составляло 0.689.

Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс  $K_p$  изменялся от 0 до 2). Незначительными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов изменялась по квазипериодическому закону с периодом около 1 сут в пределах  $(2-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$ . Составляющая  $B_z$  хаотически варьировала с амплитудой 2–3 нТл. Малосущественными были флуктуации уровня  $B_i$  (около  $\pm 1$  нТл). Достаточно упорядоченными с периодом в 1 сут были вариации  $H_p$ -компонента геомагнитного поля (в пределах 50 нТл). Значения индекса  $D_{st}$  также хаотически флуктуировали в пределах 3–5 нТл. Вариации индекса  $AE$  были незначительными, но в отдельные временные интервалы достигали 300 нТл.

Таким образом, день солнечного затмения 1 августа 2008 г. можно считать спокойным. Это обстоятельство существенно облегчает выделение возмущений, связанных с затмением. Спокойным был и контрольный день 2 августа 2008 г.

## СРЕДСТВА ЗОНДИРОВАНИЯ

**Радар некогерентного рассеяния.** Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.) [4]. Основ-

ные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м<sup>2</sup>, коэффициент усиления антенны — около 10<sup>4</sup>, ширина основного лепестка диаграммы направленности около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3,6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса  $\tau_p \leq 800$  мкс, частота следования импульсов  $F = 24.4$  Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5–9.5 кГц.

Погрешность получаемых параметров ионосферы обычно не превышает 5–10 % в дневное время и 15–30 % в ночное время.

**Ионозонд.** Ионозонд «БАЗИС» предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Ионозонд расположен рядом с радаром НР. Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты — 0.05 МГц.

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При наблюдениях ионосферы с помощью метода НР такие параметры плазмы как температуры заряженных частиц, относительное содержание ионов различных сортов и вертикальная составляющая скорости дрейфа плазмы получают в результате решения обратной радиофизической задачи.

Исходными данными являются измеренные автокорреляционные функции (АКФ) сигнала, некогерентно рассеянного ионосферной плазмой. В процессе измерений специализированный коррелятор [10] вычисляет оценки значений АКФ НР-сигнала для заданных величин временных задержек. Эти оценки накапливаются в течение сеансов измерений длительностью 1 мин и записываются с дискретностью 18.33 км вдоль всей развертки дальности.

**Коррекция методических ошибок.** Перед вычислением ионосферных параметров измеренные АКФ подвергаются коррекции с целью устранения систематических ошибок, вызываемых как спецификой инструмента исследования, так и неоднородностью по высоте параметров изучаемой среды.

Поскольку для исследований ионосферы используется радар с импульсным режимом излучения, АКФ сигнала на выходе приемного устройства радара представляет собой свертку АКФ НР-сигнала, АКФ огибающей зондирующего импульса и АКФ импульсной характеристики приемного устройства [15]. Так как количество измеряемых значений АКФ (18 шт.) мало для обеспечения высокой точности результатов операции обращения интеграла свертки, учет характеристик фильтра и зондирующего импульса проводится заранее при расчете библиотек теоретических АКФ. Для этого измеренные АКФ импульсной характеристики фильтра подвергаются операции свертки с АКФ огибающей зондирующего импульса и теоретической АКФ НР-сигнала, соответствующей задаваемым значениям параметров ионосферной плазмы.

Еще одним фактором, приводящим к искажению измеряемых АКФ, является уменьшение объемов плазмы, участвующих в образовании оценок значений АКФ, при росте величины задержки. Это связано с некоррелированностью сигналов, рассеянных объемами плазмы, отстоящими более чем на величину дебаевского радиуса экранирования [4]. В наиболее простом случае, когда характеристики плазмы могут считаться постоянными на интервале высот, соответствующем удвоенной длительности зондирующего импульса, коррекция сводится к делению измеренной АКФ на функцию  $1 - \tau / \tau_p$ , где  $\tau$  — величина задержки, соответствующая данному значению АКФ,  $\tau_p$  — длительность зондирующего импульса [13]. В более общем случае, когда параметры плазмы существенно изменяются вдоль импульсного объема, устранить смещение оценок измеряемых значений АКФ можно только с привлечением дополнительной информации о высотном распределении мощности НР-сигнала, либо измеренной со значительно лучшим пространственным разрешением, либо взятой из модели. Возможность такой коррекции предусмотрена на радаре НР Института ионосферы [11].

Для области высот ниже 300 км искажения АКФ возникают также за счет нестационарности коэффициента передачи антенного коммута-

тора. Устранение таких ошибок легко осуществляется при наличии измеренной зависимости коэффициента передачи антенного коммутатора от времени [11].

Приведенные выше корректирующие операции не решают, тем не менее, важной системной проблемы. А именно — оценки разных значений АКФ получены при разном соотношении сигнал/шум, что приводит к увеличению дисперсии оценок с увеличением задержки. Кроме того, в образовании оценок АКФ принимают участие неодинаковые пространственные области плазмы. Учет этих обстоятельств возможен при использовании так называемого трапециoidalного суммирования [11]. На больших высотах, где соотношение сигнал/шум мало, для уменьшения разброса данных параметр трапециoidalного суммирования приходится увеличивать, ухудшая тем самым разрешающую способность по высоте. Так, в период низкой солнечной активности, которая характеризуется низким уровнем НР-сигнала, разрешающая способность по высоте изменяется от 100 км на высоте 200 км до 290 км на высоте 700 км.

**Фильтрация экспериментальных данных.** Помимо высотного суммирования измеренных АКФ, для уменьшения статистической погрешности используется временное усреднение оценок, полученных в базовых 1-мин сеансах. На практике чаще всего усреднение осуществляется по 15-мин сеансам. Такой временной интервал обычно меньше характерных времен становления естественных процессов в ионосфере. Таким образом, можно считать, что временное разрешение в результате усреднения остается приемлемым.

Разработанное нами в 2008–2009 гг. программное обеспечение позволяет проводить скользящее сглаживание оценок значений измеренных АКФ. Погрешность определения параметров плазмы весьма чувствительна к погрешностям исходных данных. Тщательная первичная обработка измеренных АКФ производится опытным оператором. При этом вырезаются области с аномальными значениями АКФ (вызванными, например, попаданием в диаграмму направленности радара космического мусора). При сколь-

зщем сглаживании качество отбраковки исходных данных приобретает первостепенное значение, поскольку информация от единичного испорченного сеанса неизбежно будет перенесена на соседние. Поэтому после первичной ручной обработки перед скользящим усреднением дополнительно проводится автоматическая отбраковка данных по известному в математической статистике критерию «трех сигм».

Моделирование с использованием экспериментальных данных показало, что для вторичной отбраковки целесообразно использовать выборку из 20 1-мин оценок АКФ. Отметим, что такая фильтрация проводится как до высотного суммирования АКФ, так и после него. Это связано с тем, что выбросы, сопоставимые с уровнем НР-сигнала (и даже ниже его), могут проявиться после суммирования АКФ по высоте.

Третья фильтрация по критерию «трех сигм» производится после нормировки значений АКФ на мощность для получения коэффициента корреляции НР-сигнала. Необходимость такой фильтрации объясняется возможным возникновением выбросов на временном ходе значений оценок коэффициента корреляции. Причина появления таких выбросов — деление значений АКФ на мощность, величина которой может оказаться близкой к нулю. Вероятность подобных аномалий возрастает для больших высот ( $z > 700-800$  км), где соотношение сигнал/шум по мощности не превышает нескольких сотых и измеряемая мощность полезного сигнала флуктуирует около нуля.

**Особенности определения ионосферных параметров.** После коррекции и усреднения измеренных АКФ, полученные для заданных промежутков времени и высот коэффициенты корреляции используются для определения температур заряженных частиц, относительного содержания ионов разных сортов и вертикального компонента скорости дрейфа плазмы.

Решение обратной радиофизической задачи применительно к методу НР состоит в сравнении измеренного откорректированного коэффициента корреляции с коэффициентами корреляции, заранее рассчитанными для заданных аппаратурных характеристик и значений иско-

мых параметров. При этом возникает ряд особенностей, затрудняющих возможности однозначного определения значений ионосферных параметров по экспериментальным данным.

Одна из проблем связана с выбором шага по температурам и ионному составу при расчете библиотек коэффициентов корреляции, с которыми сравниваются экспериментальные данные. Очевидно, шаг по искомым параметрам должен быть существенно меньше статистической погрешности их определения. С другой стороны, неоправданное уменьшение этого шага приводит к недопустимо большой продолжительности расчетов.

Структура новых библиотек, построенных и используемых в Институте ионосферы в 2008–2009 гг., такова. Для заданных длительности зондирующего импульса и фильтра приемного устройства рассчитаны соответствующие библиотеки. Каждая библиотека получена при заданном отношении концентраций ионов различных сортов и содержит коэффициенты корреляции, рассчитанные для температур ионов и электронов, принимающих любые попарно взятые значения в диапазоне 500–4000 К с шагом 30 К. Шаг по ионному составу равен 2 % в диапазоне отношения концентраций ионов 0–12 % и 4 % при относительном содержании больше 12 %. Относительное содержание ионов атомарного водорода может изменяться от 0 до 100 %, гелия — от 0 до 44%. Это дает в итоге общее число библиотек, равное 363.

При поиске параметров используется критерий наименьшего среднего квадратичного отклонения измеренного коэффициента корреляции от полученного теоретически. Полное сравнение со всеми библиотечными функциями занимает недопустимо много времени (вплоть до нескольких суток). Применение обычных методов ускорения процесса поиска, таких как метод последовательных приближений, затруднено из-за шумоподобного характера полезного сигнала и наличия аддитивного шума. В такой ситуации важно правильно выбрать шаги по искомым параметрам при поиске первого (грубого) и последующих (уточненных) минимумов среднего квадратичного отклонения.

Не менее важно правильно выбрать границы области поиска при уточнении грубого минимума. Такая задача была решена с помощью статистического моделирования. При этом использовались данные, полученные для наиболее неблагоприятных с точки зрения погрешностей условий (ночь, большие высоты, минимум солнечной активности). Ставилась задача найти оптимальные шаг по температурам при поиске грубого минимума и область поиска при его уточнении с шагом 30 К. Под оптимальностью подразумевалось отсутствие расхождений между результатами, полученными методом полного перебора библиотечных функций и методом последовательных приближений при минимальном времени расчетов по последнему алгоритму. В соответствии с этими требованиями был определен шаг при грубом поиске, равный 120 К, и область поиска около грубого минимума, равная  $\pm 240$  К. При этом быстродействие обработки возросло на порядок по сравнению с полным перебором.

**Преимущества используемых методик.** Благодаря существенному увеличению скорости определения ионосферных параметров стал возможным анализ экспериментальных данных для большего количества высот. А главное, появилась возможность получать суточные вариации ионосферных параметров с шагом по времени 1 мин. Наличие такой большой выборки полученных результатов в значительной мере позволяет преодолеть проблему неоднозначности, которая всегда существует при решении обратной задачи для нелинейной многопараметрической функции (особенно при большом разбросе исходных данных). Так, например, одновременное рассмотрение вариаций ионной температуры и относительного содержания ионов гелия в большинстве случаев дает возможность уверенно сделать заключение о наличии или отсутствии последнего в действительности (это легко установить по относительной частоте появления ненулевых значений относительного содержания ионов гелия и по четкой временной корреляции больших выбросов этого параметра с аномальными провалами на временном ходе температуры ионов). Дополнительный конт-

роль осуществляется при сравнении результатов, полученных на соседних высотах.

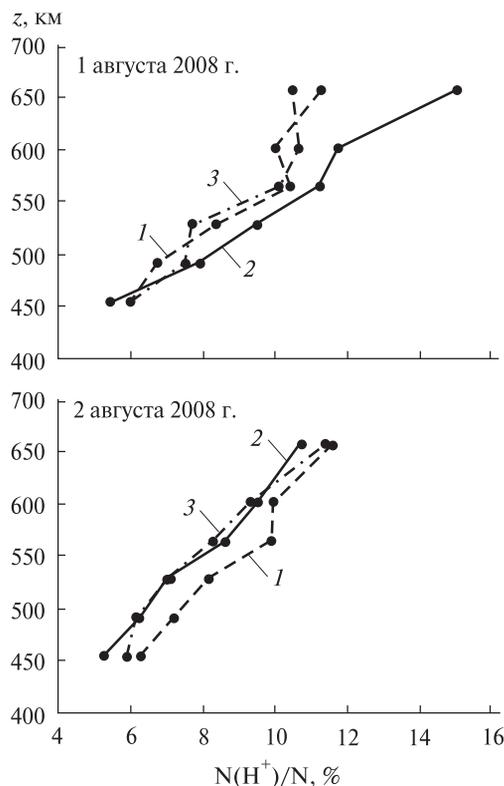
Модельные исследования показали, что используемый анализ экспериментальных данных позволяет получать надежные результаты в диапазоне высот, где уровень соотношения сигнал/шум по мощности больше нескольких сотых.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Высотные вариации относительного содержания ионов водорода.** На рис. 1 представлены высотные зависимости относительного содержания ионов водорода  $N(\text{H}^+)/N$  ( $N$  — концентрация электронов) для трех моментов времени в день СЗ: до начала затмения, вблизи его максимальной фазы, а также после окончания затмения. Видно, что во время главной фазы СЗ наблюдалось увеличение относительного содержания ионов водорода на всех высотах выше 450 км, причем эффект увеличения отношения  $N(\text{H}^+)/N$  усиливался с ростом высоты (от 18 % на высоте 491 км до 33 % на высоте 656 км). После окончания затмения выше 450 км происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода. В целом высотный профиль  $N(\text{H}^+)/N$  имел тенденцию принять вид профиля до затмения.

На рис. 1 также приведены аналогичные зависимости для тех же моментов времени для контрольного дня 2 августа 2008 г. Поведение высотных профилей  $N(\text{H}^+)/N$  для контрольного дня характерно для спокойных условий. Видно, что на рассматриваемом интервале времени происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода практически на всех высотах, а максимальное значение  $N(\text{H}^+)/N$  было меньшим 12 %, тогда как во время главной фазы СЗ оно достигало 15 %.

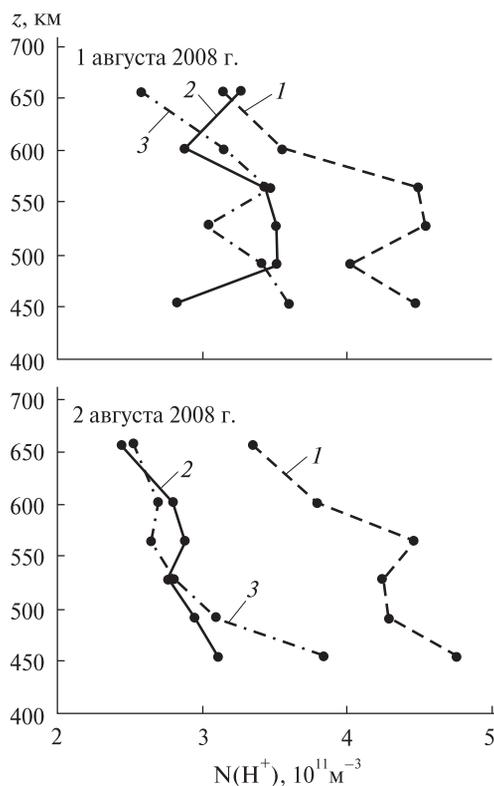
**Высотные вариации концентрации ионов водорода.** На рис. 2 представлены высотные зависимости концентрации ионов водорода  $N(\text{H}^+)$  в рассматриваемые моменты времени для дня затмения и для контрольного дня. Видно, что в отличие от времени до и после затмения, во время главной фазы СЗ для высот, меньших 491 км, наблюдалось уменьшение концентрации ионов водорода. Для высот, больших 564 км, уменьшение величины  $N(\text{H}^+)$  не обнаруживалось.



**Рис. 1.** Высотные профили относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 — 8:10 UT, 2 — 10:10 UT (главная фаза СЗ), 3 — 12:10 UT

В отличие от дня затмения, 2 августа 2008 г. формы профилей  $N(H^+)$  качественно схожи между собой.

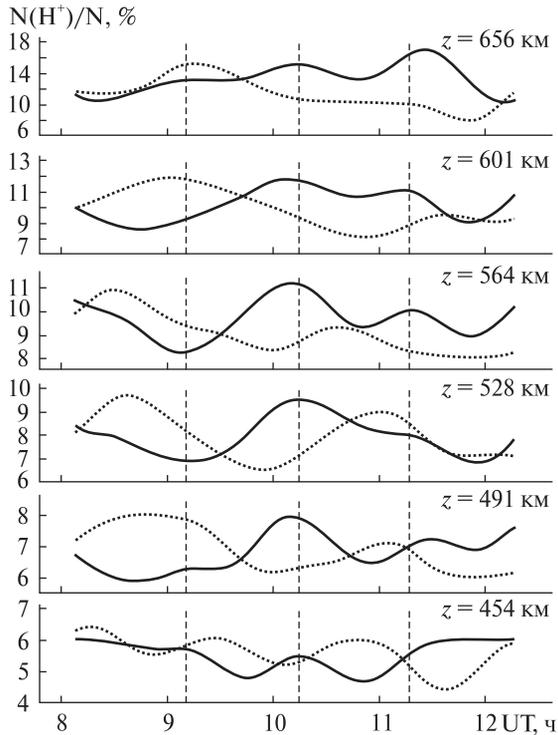
**Временные вариации относительного содержания ионов водорода.** На рис. 3 представлены временные вариации отношения  $N(H^+)/N$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Сравнение результатов показывает, что для всех высот, больших 454 км, в период главной фазы СЗ отношение  $N(H^+)/N$  для дня затмения больше, чем для контрольного дня. Степень расхождения увеличивалась с ростом высоты и составляла 33 и 50% на высотах 491 и 656 км соответственно. Кроме этого, в отличие от контрольного дня в день затмения на рассматриваемых высотах наблюдалось возрастание относительного содержания ионов водорода вблизи начала главной фазы СЗ.



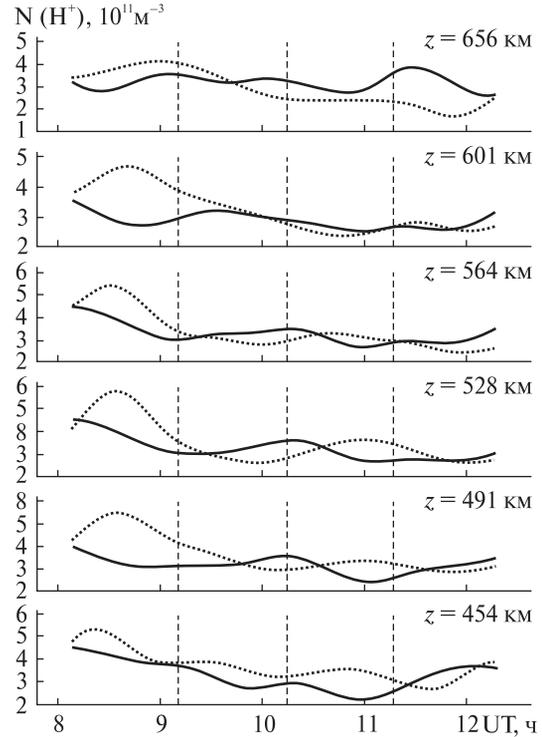
**Рис. 2.** Высотные профили концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 — 8:10 UT, 2 — 10:10 UT (главная фаза СЗ), 3 — 12:10 UT

Следует отметить, что на больших высотах рост отношения  $N(H^+)/N$  начинался на несколько десятков минут раньше начала затмения, а на малых высотах — запаздывал по отношению к началу затмения на то же время. Обратная картина наблюдается при уменьшении отношения  $N(H^+)/N$ , т. е. продолжительность фазы повышенных значений относительного содержания ионов водорода была большей на больших высотах.

**Временные вариации концентрации ионов водорода.** На рис. 4 представлены временные вариации концентрации ионов водорода  $N(H^+)$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Временные вариации величины  $N(H^+)$  не имеют общих для рассматриваемых высот тенденций, как это происходит с относительным содержанием  $N(H^+)/N$ . На всех рассматриваемых



**Рис. 3.** Временные вариации относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. (сплошная линия) и контрольный день 2 августа 2008 г. (точки) для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин



**Рис. 4.** Временные вариации концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. (сплошная линия) и контрольный день 2 августа 2008 г. (точки) для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин

высотах в день затмения и контрольный день ионы гелия не были обнаружены.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Вариации относительного содержания ионов водорода.** Очевидно, увеличение отношения  $N(H^+)/N$  на рассматриваемых высотах во время затмения было обусловлено притоком ионов из плазмосферы подобно тому, как это происходит ночью. Аналогичное поведение отношения  $N(H^+)/N$  отмечалось и для других наблюдавшихся в обсерватории Института ионосферы затмений (11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.) [1–3, 5–9, 12].

Поведение отношения  $N(H^+)/N$  во времени (несовпадение моментов начала роста и уменьшения относительного содержания для разных высот, не выраженное столь отчетливо для дру-

гих упомянутых СЗ) может быть объяснено не только тем, что в верхней части ионосферы СЗ начинается раньше, чем на малых высотах, а заканчивается — позже (при этом охлаждение плазмы и приток ионов водорода из плазмосферы фиксируется сначала на больших высотах). 1 августа 2008 г. отмеченный эффект, возможно, усиливался благодаря тому, что лунная тень приближалась к пункту наблюдения с севера. В этом случае для северного полушария имеет место следующая картина. Основания трубок геомагнитного поля, проходящих над пунктом наблюдения на небольших высотах, еще не находятся в области затмения. В то же время лунная тень уже покрывает основания трубок геомагнитного поля, берущих начало севернее, и, как следствие, проходящих над пунктом наблюдения на больших высотах. В результате плазма

в этих трубках начинает охлаждаться еще до начала СЗ непосредственно над пунктом наблюдения. Это приводит к уменьшению давления плазмы в магнитной трубке и появлению нисходящего потока (вдоль силовых линий геомагнитного поля) ионов водорода из плазмосферы. Вследствие этого, вероятно, и возникает опережение роста отношения  $N(H^+)/N$  на больших высотах по сравнению с меньшими и даже по отношению ко времени начала затмения.

**Вариации концентрации ионов водорода**, получаемой как результат умножения концентрации электронов  $N$  на величину относительного содержания  $N(H^+)/N$ , могут быть объяснены при рассмотрении поведения каждого из этих параметров. Так, в главную фазу СЗ ниже 491 км сравнительно большое уменьшение значений  $N$  происходило при практически неизменном отношении  $N(H^+)/N$ . Как результат, для этих высот произошло отмеченное выше уменьшение концентрации ионов водорода. На больших высотах, напротив, при более существенном увеличении значений отношения  $N(H^+)/N$  концентрация электронов уменьшалась не так сильно. Вследствие этого снижение концентрации ионов водорода для высот, больших 564 км, не отмечалось.

Таким образом, реакция ионного состава во внешней ионосфере на СЗ 1 августа 2008 г. была качественно подобна реакциям, наблюдавшимся во время затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. [1–3, 5–9, 12]. Количественные отличия объясняются тем, что эти СЗ имели место в разных гелиогеофизических условиях.

Отметим, что небольшие системные изменения величин  $N(H^+)/N$  и  $N(H^+)$  на столь малых высотах (начиная с 450 км) удалось обнаружить благодаря применению нового программного обеспечения, в котором используются библиотеки с шагом по ионному составу 2 % при  $N(H^+)/N < 16$  %.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что сравнительно слабое затмение Солнца 1 августа 2008 г. (максимальная затененная площадь диска составляла около 31 %), тем не менее, привело к качественным и количественным

изменениям вариаций ионного состава во внешней ионосфере.

2. Выявлено, что во время главной фазы СЗ относительное содержание ионов водорода увеличивалось по сравнению с контрольным днем в области высот 450–650 км. Различие в профилях  $N(H^+)/N$  увеличивалось с ростом высоты и составляло 33 и 50 % на высотах 491 и 656 км соответственно.

3. Отмечено, что временная динамика высотных профилей относительного содержания ионов водорода в день СЗ существенно отличалась от контрольного дня. Такое поведение отношения  $N(H^+)/N$  объясняется появлением в течение затмения нисходящих потоков плазмы из протоносферы.

4. Предложена гипотеза, позволяющая объяснить выраженное опережение начала увеличения отношения  $N(H^+)/N$  на больших высотах по сравнению с меньшими и по отношению к началу затмения. Предполагается, что такой эффект усиливался из-за того, что 1 августа 2008 г. лунная тень приближалась к пункту наблюдения с севера.

5. Указано, что причиной качественных отличий профиля концентрации ионов водорода в момент главной фазы СЗ является противоположный характер количественных изменений концентрации электронов и отношения  $N(H^+)/N$  с увеличением высоты.

6. Установлено, что реакция ионного состава во внешней ионосфере на СЗ 1 августа 2008 г. была качественно подобна реакциям, наблюдавшимся во время затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. Количественные отличия, очевидно, объясняются тем, что эти СЗ происходили при разных гелиогеофизических условиях.

7. Отмечено, что с помощью нового программного обеспечения удалось наблюдать небольшие системные изменения величин  $N(H^+)/N$  и  $N(H^+)$  на высотах начиная с 450 км. Ранее изучение таких «тонких» эффектов было недоступным.

*Авторы благодарят Л. Я. Емельянова, А. Ф. Кононенко, И. Б. Склярова и Ю. В. Черняка за проведение измерений на харьковском радаре некогерентного рассеяния.*

1. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэронаука. — 2005. — **45**, № 4. — С. 526–551.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25–63.
3. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. — 2005. — № 3. — С. 55–70.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
5. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 3. — С. 38–53.
6. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 6. — С. 74–86.
7. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 82–91.
8. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэронаука. — 2008. — **48**, № 3. — С. 350–364.
9. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокомической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 1. — С. 12–25.
10. Лысенко В. Н. Программируемый коррелятор для измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния // Вестник Харьков. гос. политех. ун-та. — Вып. 1, № 1. — С. 96–99.
11. Лысенко В. Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентно рассеянного сигнала // Радиофизика и электротехника. — 2002. — **7**, № 1. — С. 82–88.
12. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 57–64.
13. Рогожкин Е. В. Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния // Ионосферные исследования. — 1979. — № 27. — С. 46–59.
14. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука. — 2001. — **41**, № 5. — С. 659–666.
15. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. — 1969. — **57**, № 4. — С. 139–175.
16. Baron M. J. Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total eclipse of July 10, 1972 // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**, N 31. — P. 7451–7460.
17. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 1. — P. 131–142.
18. Evans J. V. On the behavior of  $f_0F_2$  during solar eclipses // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 3. — P. 733–738.
19. MacPherson B., Gonzalez S. A., Silzer M. P., et al. Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during total solar eclipse of February 26, 1998 // J. Geophys. Res. — 1998. — **105**, N A10. — P. 23.055–23.068.
20. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., et al. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. — 1986. — **91**, N A2. — P. 1651–1660.
21. Sterling D. L., Hanson W. B., Woodman R. F. Synthesis of data obtained at Jicamarca, Peru, during the September 11, 1969, eclipse // Radio Sci. — 1972. — **7**, N 2. — P. 279–289.

Надійшла до редакції 30.04.09

D. V. Kotov, V. A. Pulyayev, L. F. Chernogor

#### TIME VARIATIONS OF ION COMPOSITION IN THE TOPSIDE IONOSPHERE DURING THE 1 AUGUST 2008 SOLAR ECLIPSE

The results of observations of ion composition behaviour in the topside ionosphere during the 1 August 2008 partial (phase is 0.42) solar eclipse are presented. The measurements were carried out using the Kharkiv incoherent scatter radar. It is shown that during the main phase of the solar eclipse, in the 450–650 km altitude range, fractional content of protons increased to 50 % as compared with the control day. The start of fractional content increasing was different at the different altitudes and increasing above 560 km was advancing the solar eclipse start above the observatory. We suggest that this effect can be interpreted by the lunar shadow approaching to the observatory from north.

УДК 550.385.37: 550.388

**Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ВБЛИЗИ г. ХАРЬКОВА, СОПУТСТВОВАВШИЕ ПРОХОЖДЕНИЮ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

---

*Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля поблизу м. Харкова в діапазоні періодів 1–1000 с, які супроводжували проходження сонячного термінатора у ранкові та вечірні часи у 2002–2008 рр. Проведено спектральний аналіз, за допомогою якого виявлено квазіперіодичні збурення, викликані рухом сонячного термінатора, та оцінено їхні параметри. Виявилось, що період збурень складає 9–11 хв, тривалість — 45–55 хв і амплітуда — 3–5 нТл. Запізнення реакції геомагнітного поля на проходження сонячного термінатора змінювалось в межах 30–40 та 80–90 хв для ранкового і 60–80 хв для вечірнього термінатора.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

При изучении отклика геомагнитного поля на старты ракет часто возникает задача выделения и разделения эффектов прохождения солнечного терминатора (СТ) и эффектов стартов ракет. Дело в том, что космические аппараты преимущественно стартуют в утренние и вечерние часы [6, 20–22].

Согласно оценкам вариации магнитного поля, вызванные прохождением СТ, могут достигать нескольких нанотесла, что соизмеримо с величинами наблюдаемых нами геомагнитных эффектов стартов ракет [6, 20–22].

Максимальная величина эффектов в атмосфере, генерируемых СТ, скорее всего, наблюдается в диапазоне высот примерно 100–180 км [14]. Это связано с поглощением энергии в термосфере. Здесь имеют место наибольшие температурные градиенты [14]. Примерно на этих же высотах эффективно генерируются волны стартовыми ракетами [24].

Для повышения надежности выделения возмущений, вызванных стартами и полетами ракет, на фоне естественных переходных процес-

сов возникла необходимость детального изучения эффектов СТ в геомагнитном поле как отдельного источника высокоэнергетического воздействия. Разумеется, что подобное изучение имеет и самостоятельное значение.

Солнечный терминатор относится к систематически действующим источникам генерации возмущений во всех подсистемах системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [15–17, 20]. В настоящее время есть ряд теоретических моделей, которые позволяют с определенной точностью описать структуру и параметры СТ как источника высокоэнергетического воздействия на среду, а также установить основные пространственно-временные параметры генерируемых им возмущений [11].

Изучению эффектов СТ посвящен ряд работ [1–4, 7, 11–14, 23, 24]. Так, в работе [12] теоретически показано, что переходные процессы, вызываемые движением СТ, приводят к генерации перемещающихся волновых возмущений, турбулентных образований, неоднородностей электронной концентрации, устойчивых структур нейтральной компоненты, вариаций электрического и магнитного полей, возникновению и усилению неустойчивостей вблизи области воздействия.

Комплексные экспериментальные работы [1–4, 7, 23, 24] отчасти подтверждают результаты теоретического моделирования. В настоящее время эффект генерации солнечным терминатором возмущений в атмосфере и ионосфере не вызывает сомнений. Вопрос возможной генерации возмущений геомагнитного поля, насколько нам известно, до сих пор не исследовался.

Целью настоящей работы является выявление и анализ возмущений, генерируемых прохождением солнечного терминатора в утренние и вечерние часы, по результатам наблюдений флуктуации геомагнитного поля в диапазоне периодов 1–1000 с вблизи г. Харькова.

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

**Магнитометр-флюксметр.** Несерийный высокочувствительный магнитометр, включенный в состав программно-аппаратного комплекса, размещен в обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.) [5]. Его геофизические координаты: 49°40' с. ш., 36°50' в. д., геомагнитные координаты: +45°20' геомагнитной широты, 119°20' в. д.

Магнитометр-флюксметр измеряет уровень флуктуации. Его чувствительность составляет 0.5–500 пТл в диапазоне периодов 1–1000 с соответственно.

Методики измерений и анализа аналогичны описанным авторами в работе [6].

Для исследований возмущений, вызванных СТ, целесообразно выбрать четыре характерных геофизических временных периода: вблизи зимнего и летнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий. Как утверждает в работе [14], в периоды весеннего и осеннего равноденствий скорости распространения возмущений параметров ионосферы максимальны, а влияние диффузии минимально. Именно в эти периоды эффекты в ионосфере наблюдались более четко [12, 14].

Определению подлежали времена запаздывания возможной реакции геомагнитного поля на прохождение СТ, ее продолжительность и спектральный состав возникающих возмуще-

ний. В качестве гипотезы, опираясь на данные [22], примем, что геомагнитные пульсации эффективно генерируются волновыми возмущениями, возникающими в атмосфере и ионосфере под действием СТ в диапазоне высот 100–180 км. Их механизм связан с модуляцией этими волновыми возмущениями токовой струи. Исходя из этого, для утреннего СТ в качестве высоты отсчета выбиралась высота восхода Солнца на уровне 200 км, для вечернего — заход Солнца на уровне Земли.

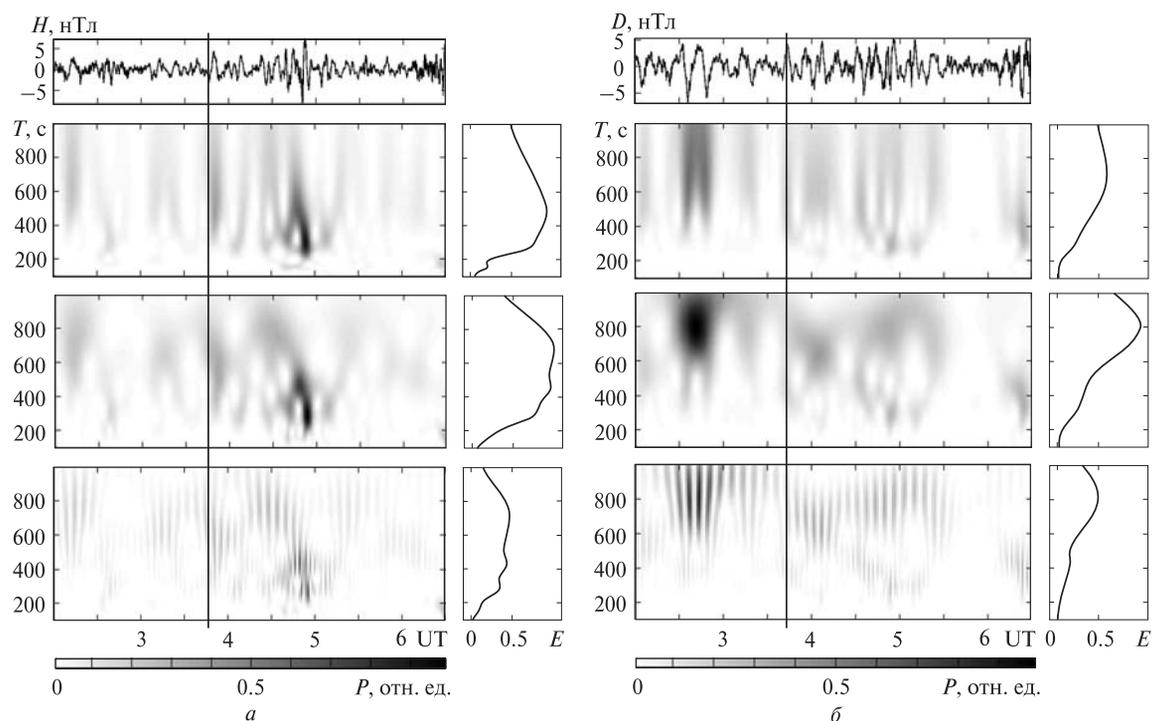
Периоды квазипериодических процессов определялись при помощи системного спектрального анализа, включающего в себя оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП) на основе вейвлета Морле, детально описанного в работах [9, 10, 18]. Кроме динамических спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой распределение средней энергии колебаний по периодам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Утренний солнечный терминатор.** Для примера рассмотрим четыре случая прохождения утреннего СТ в зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Начало реакции отсчитывается от момента восхода Солнца на высоте 200 км над уровнем Земли вблизи места расположения обсерватории.

На рис. 1 приведены временные вариации уровней горизонтальных компонентов геомагнитного поля и их спектров, сопровождавшие восход Солнца 15 декабря 2003 г. в 03:45 (здесь и далее используется время UT). Изменения характера (незначительное увеличение амплитуды и уменьшение периода до 5–7 мин) сигнала *H*- и *D*-компонентов имели место через 35 и 44 мин после восхода Солнца на высоте 200 км и продолжались 44 мин. Следующие возмущения имели место через 88–90 мин, продолжительности составляли 38–42 мин. Эти возмущения проявлялись как подавление колебаний в обоих компонентах сигнала. Преобладали периоды 6–10 мин.

Результаты измерений и анализа вариаций геомагнитного поля, сопутствовавшие СТ



**Рис. 1.** Временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонентов геомагнитного поля (панели  $a$  и  $b$ ) и соответствующие им периоды  $T$ , полученные методами ОПФ, АПФ, ВП (сверху вниз), а также энергограммы  $E(T)$  (справа) в диапазоне периодов 100–1000 с, сопровождавшие прохождение солнечного терминатора 15 декабря 2003 г. Сплошной вертикальной линией показан момент восхода Солнца на высоте 200 км вблизи г. Харькова

16 марта 2004 г. (02:28), приведены на рис. 2. С запаздыванием 35 мин в  $H$ -компоненте фиксировалось появление высокочастотной составляющей, волновой процесс длился 40 мин с периодом 7 мин. В  $D$ -компоненте волновой процесс был выражен слабее и имел запаздывание 30 мин, продолжительность 40 мин и преобладающий период около 13 мин. Возмущение второго типа имело запаздывание 81–95 мин и длительность 46–48 мин. Преобладающие периоды составляли 13–14 мин для обоих типов возмущений.

На рис. 3 представлены временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонент геомагнитного поля и результаты их спектрального анализа, сопутствовавшие прохождению утреннего СТ 16 июня 2003 г. в 22:52. Значительные изменения характера вариаций с увеличением амплитуды в два раза наблюдалось через 23–24 мин для  $H$ - и  $D$ -компонент соответственно. Возмущения про-

должались около 37 мин и имели периоды 8–14 мин. Следующее изменение характера сигнала продолжительностью 40 мин и периодом 13 мин, хорошо выраженное в  $D$ -компоненте, имело место через 94 мин после прохождении терминатора. В  $H$ -компоненте это волновое возмущение проявлялось слабо.

Пример временных вариаций уровня компонент геомагнитного поля и соответствующих им спектров, последовавших после восхода Солнца в 01:34 13 августа 2006 г., приведены на рис. 4. Характерный волновой процесс наблюдался через 41 и 35 мин для  $H$ - и  $D$ -компонент соответственно. Наблюдалось усиление уровня сигнала примерно в 1.5 раза, которое продолжалось около 40 мин. Возмущение второго типа в этот день наблюдалось с запаздыванием 120–130 мин и имело продолжительность около 50 мин. Периоды волновых процессов составляли 8–10 мин.

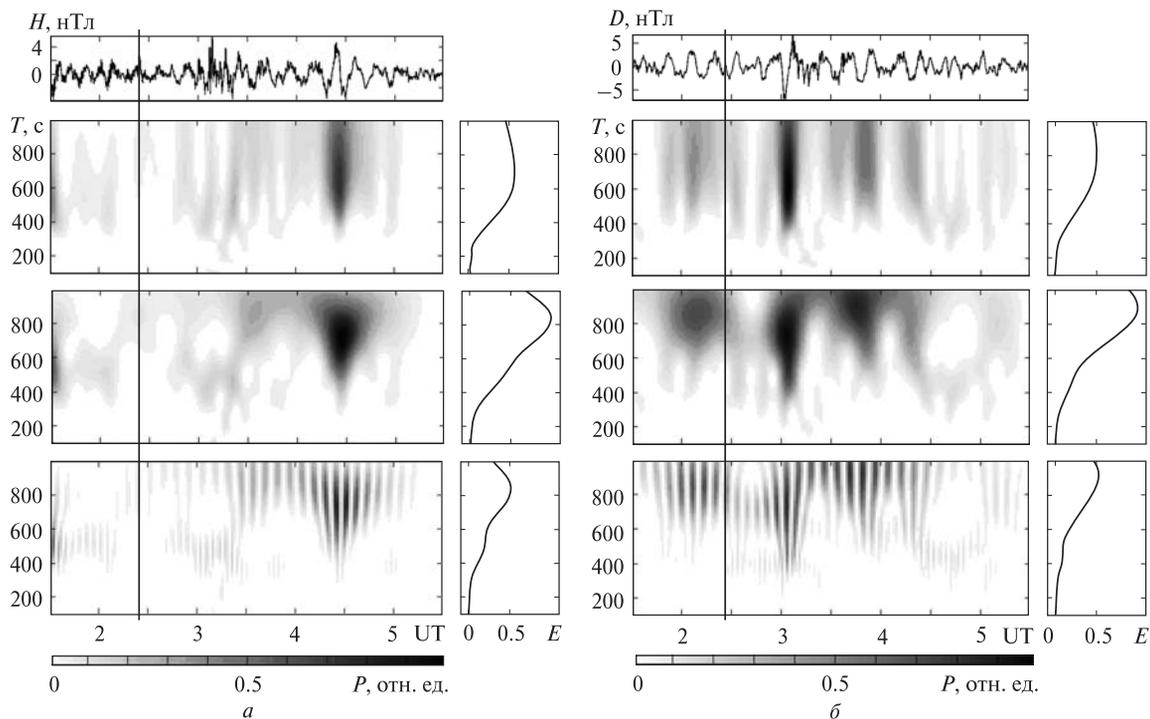


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 26 марта 2004 г.

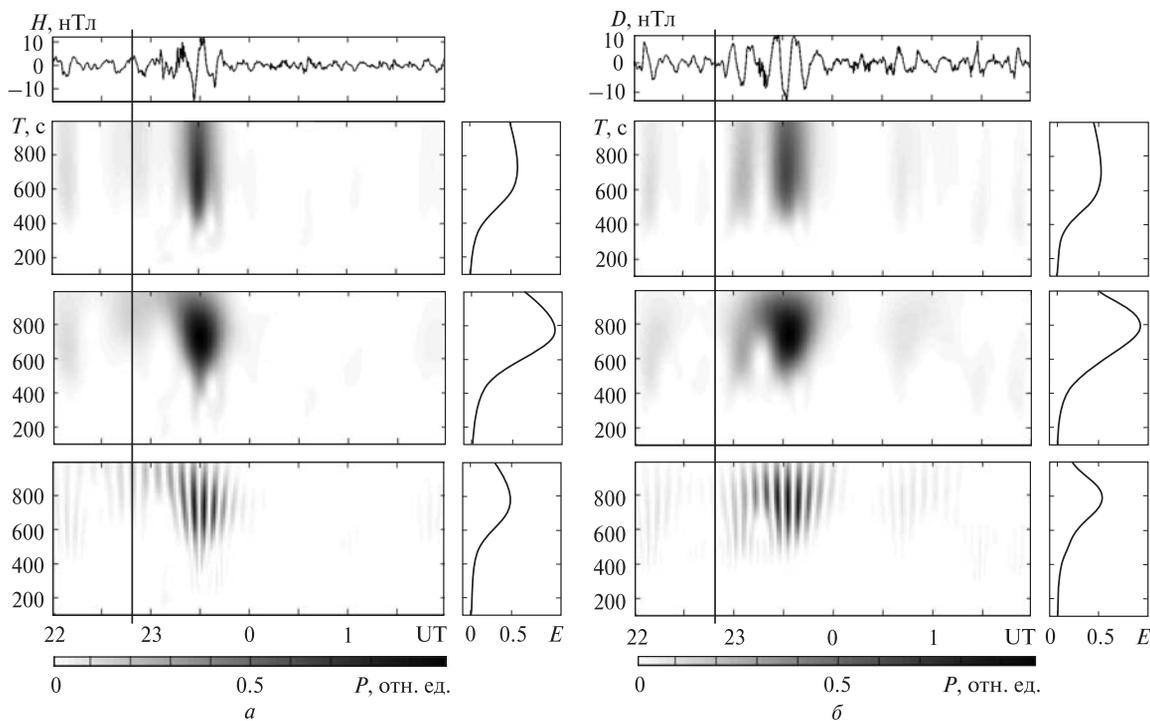


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 16 июня 2003 г.

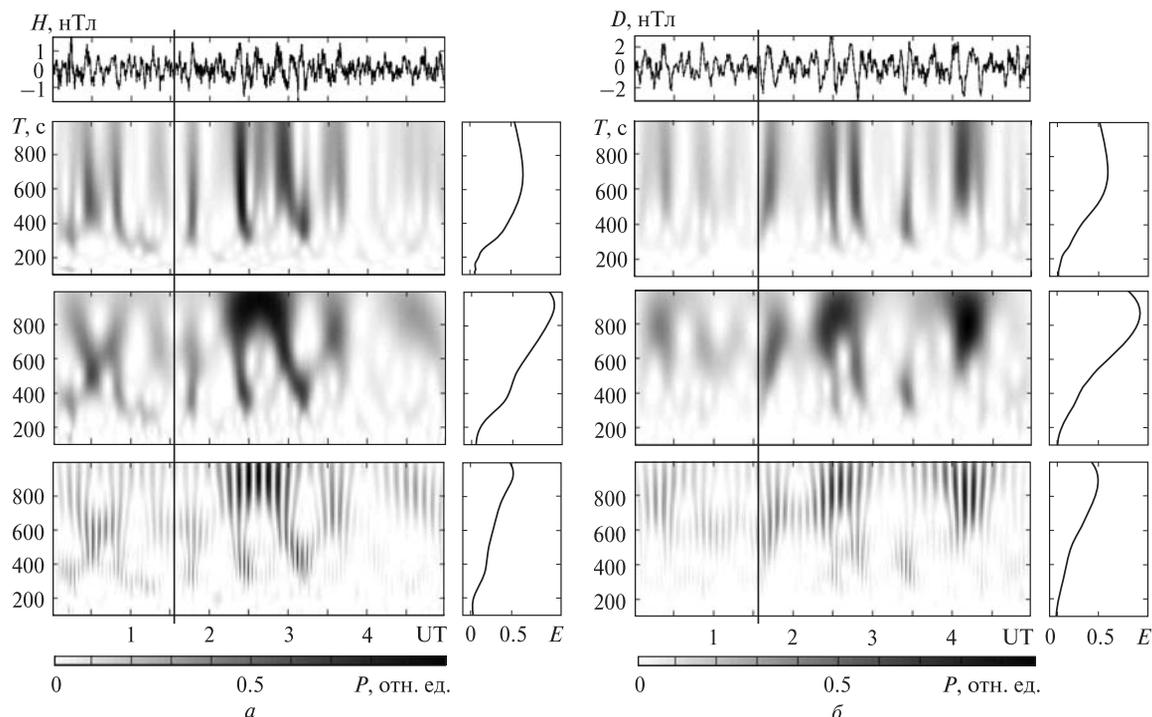


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 13 сентября 2006 г.

**Вечерний солнечный терминатор.** Рассмотрим четыре случая прохождения вечернего СТ в зимний, весенний, летний и осенний сезоны. Начало реакции отсчитывается от момента захода Солнца на уровне Земли вблизи расположения обсерватории

Временные вариации уровней горизонтальных компонентов геомагнитного поля и их спектров, сопровождавшие движение вечернего СТ, приведены на рис. 5. Заход Солнца на уровне Земли 16 декабря 2003 г. наблюдался в 13:34. Эффекты СТ, выраженные как изменение амплитуды и периода с продолжительностью около 55 мин, наблюдались через 60 мин в  $H$ -компоненте. В  $D$ -компоненте имело место возмущение с запаздыванием 75–80 мин и продолжительностью 40 мин. Преобладающие периоды составляли 9–12 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов сигнала.

Вариации уровня компонентов геомагнитного поля при прохождении СТ 31 марта 2005 г. в 16:02 показаны на рис. 6. Примерно через 50 мин наблюдалось изменение характера сиг-

нала, которое продолжалось примерно 40 мин и сопровождалось увеличением амплитуды в 1.5–2 раза и появлением высокочастотной составляющей в  $H$ -компоненте. Периоды составляли 7 и 13 мин для  $H$ - и  $D$ -компонентов соответственно.

На рис. 7 представлены временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонентов магнитного поля Земли, сопутствовавшие заходу Солнца 26 июня 2003 г. в 17:46. Характерный волновой процесс наблюдался примерно через 40–45 мин в  $H$ - и  $D$ -компонентах соответственно. Продолжительность возмущений была около 30–40 мин. Периоды волновых процессов составляли 8–10 мин.

Прохождение вечернего терминатора 13 сентября 2004 г. в 15:55 сопровождалось ростом амплитуд  $H(t)$  и  $D(t)$  примерно в 1.5–2 раза и появлением высокочастотной составляющей в обоих компонентах (рис. 8). Возмущения имели запаздывания 80–90 мин. Продолжительность этого процесса была около 50–70 мин. Периоды составляли 10–13 мин для обоих компонентов сигнала.

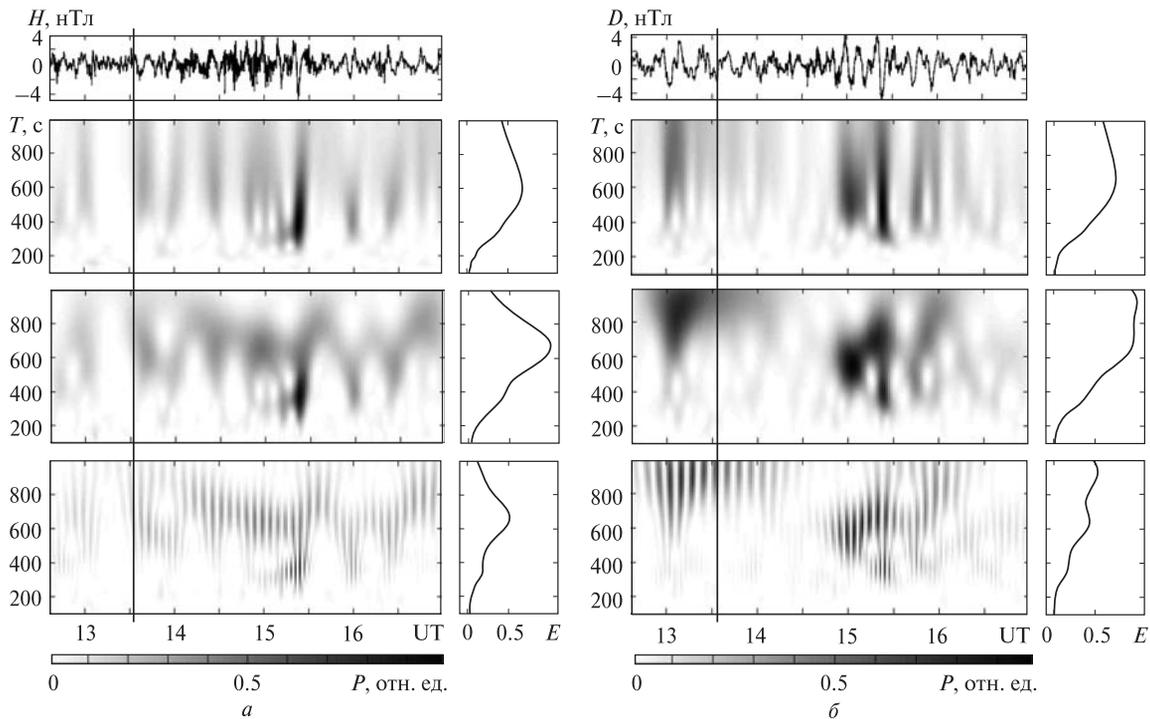


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для 6 декабря 2006 г. Сплошной вертикальной линией показан момент захода Солнца на уровне Земли вблизи г. Харькова

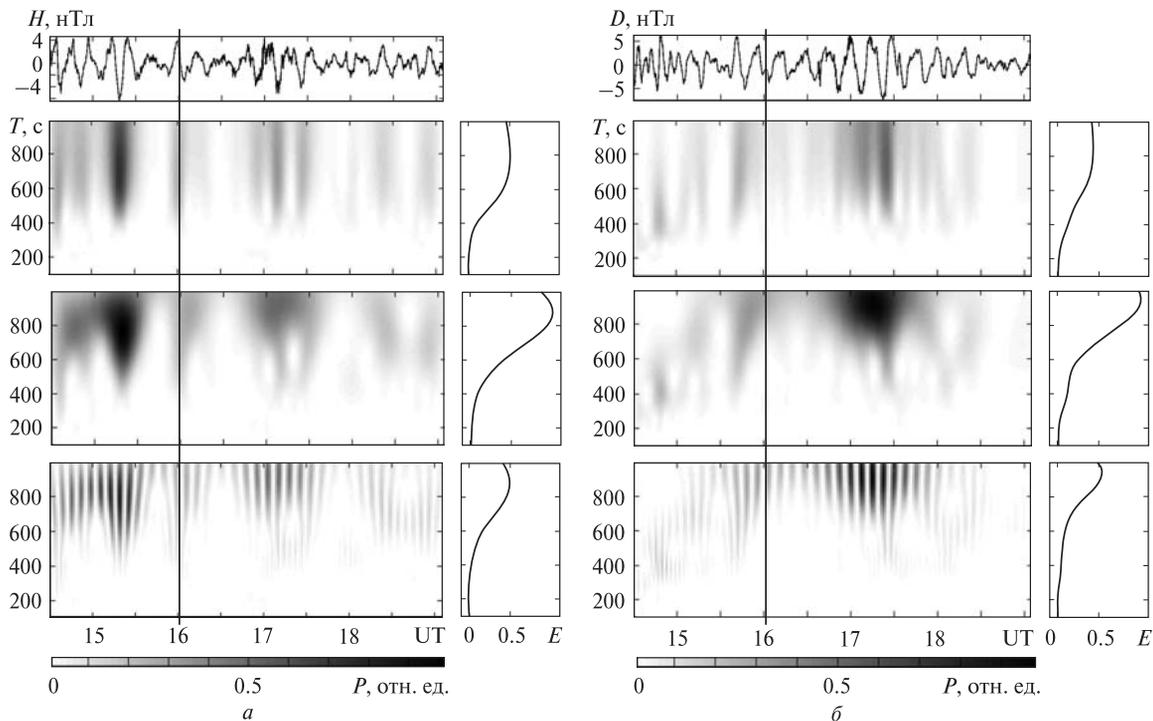


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для 31 марта 2005 г.

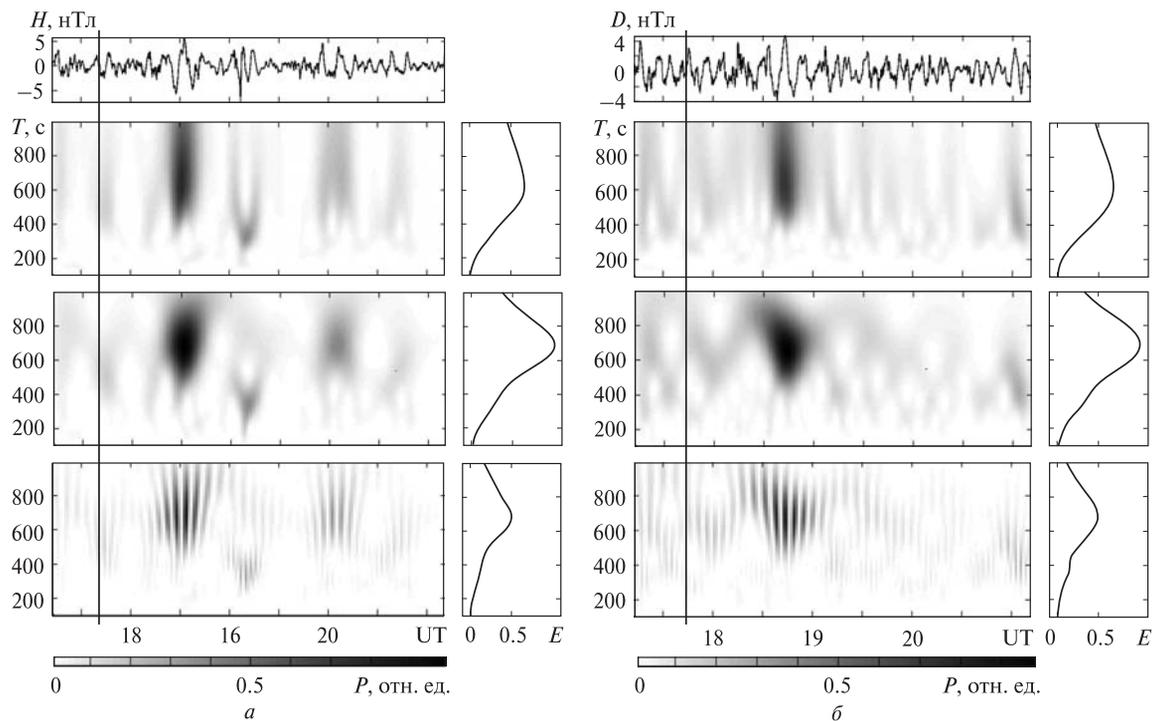


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для 26 июня 2003 г.

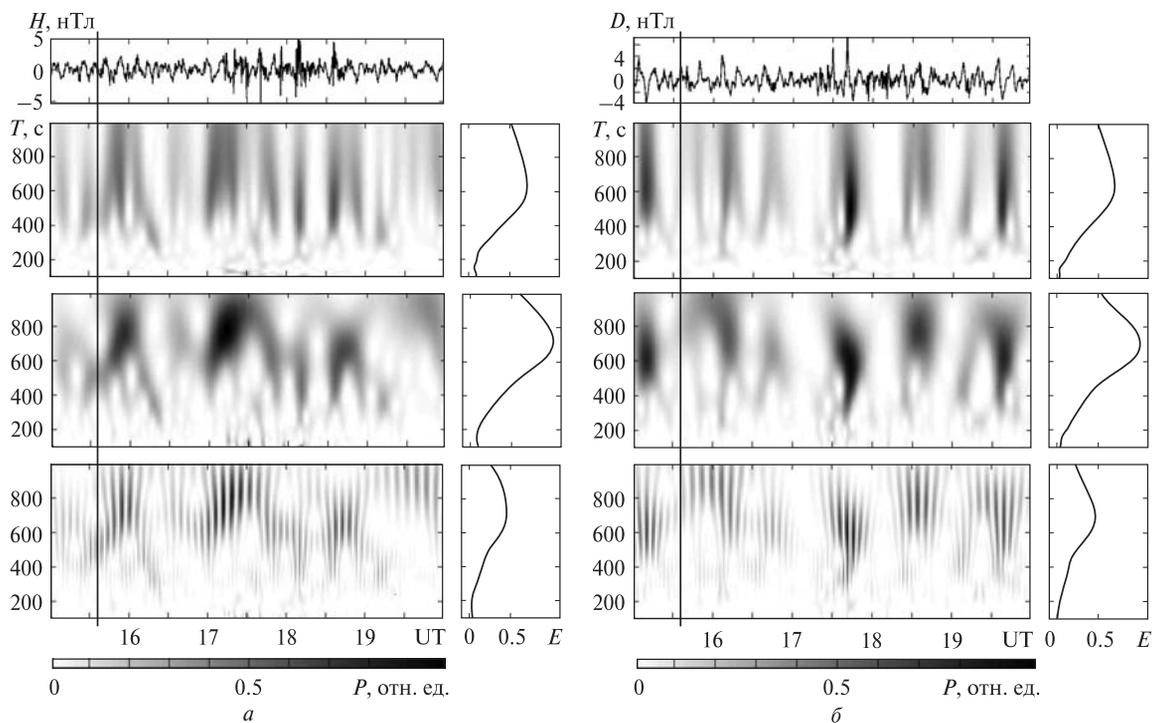


Рис. 8. То же, что на рис. 5, для 13 сентября 2004 г.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения вариаций геомагнитного поля, сопровождавших прохождение СТ в характерные сезоны, показали, что в большинстве случаев (60–70 %) характер сигналов изменяется. Для оценки основных параметров ВВ был применен системный спектральный анализ при помощи ОПФ, АПФ и ВП. Оценены времена запаздываний, продолжительности и преобладающие периоды возможной реакции геомагнитного поля на прохождение СТ. Параметры возмущений в разные сезоны существенно не различались, т. е. характер наблюдаемых возмущений был в целом подобен. Эффекты представляли собой квазипериодический волновой процесс с преобладающими периодами примерно 9–11 мин, длительностью около 45–55 мин. Характерные возмущения, сопутствовавшие прохождению СТ, сопровождались в основном изменением периода преобладающих колебаний и увеличением (в ряде случаев подавлением) уровня магнитометрических сигналов в 1.5–2 раза.

В утренние часы наблюдались два типа возмущений с запаздываниями около 35 и 85 мин относительно момента восхода Солнца на высоте 200 км для первого и второго возмущений соответственно. Можно предположить, что они являются соседними периодами более продолжительного волнового процесса, т. е. волны, промодулировавшей квазипериодические вариации геомагнитного поля с периодом около 50 мин.

Для вечернего СТ имел место квазипериодический волновой процесс с запаздыванием около 75 мин относительно момента захода Солнца на уровне Земли.

Отметим, что наблюдаемые ВВ принципиально ничем не отличались от возмущений, связанных с источниками другой природы, и в ряде случаев (30–40 %) принятие решения о наличии эффектов, связанных с воздействием, было затруднено.

Для подтверждения наличия эффектов солнечного терминатора и получения более точных оценок основных параметров волновых процессов необходимо проведение статистической обработки большого массива данных. Также целе-

сообразной является аналогичная обработка для контрольных интервалов времени (невозмущенных СТ) и сравнение ее результатов с результатами для утренне-вечерних часов.

## ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования реакции геомагнитного поля на прохождение утреннего и вечернего СТ в характерные сезоны года. Установлено, что в большинстве случаев (60–70 %) наблюдалось изменение характера магнитометрических сигналов, сопутствовавшее прохождению СТ.

2. Оказалось, что эффекты солнечного терминатора в разные сезоны в целом подобны.

3. Проведенный системный спектральный анализ при помощи ОПФ, АПФ и ВП позволил оценить основные параметры характерных квазипериодических процессов. Обычно период преобладающих колебаний составлял 9–11 мин, их продолжительность — 45–55 мин и времена запаздывания — 30–40 и 80–90 мин для утреннего и 60–80 мин для вечернего терминатора.

4. Сопровождавшие прохождение СТ геомагнитные пульсации имели амплитуды 3–5 нТл и принципиально мало чем отличались от возмущений другой природы. Для уверенного выявления реакции геомагнитного поля на прохождение СТ требуется статистический анализ большого массива данных.

1. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжнев В. И., Зусманович А. Г. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1988. — **24**, № 2. — С. 134–143.
2. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 2. — С. 143–162.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 4. — С. 518–534.
4. Гармаш К. П., Гокон А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различ-

- ной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // Вестник Харьков. ун-та. Сер. Радиофизика и электроника. — 1998. — № 405. — С. 157–177.
5. *Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др.* Статистические характеристики флуктуации электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 2. — С. 163–180.
  6. *Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 7/6. — С. 87–98.
  7. *Гоков А. М., Гритчин А. И.* Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радишумов // Геомагнетизм и аэрономия. — 1994. — **34**, № 2. — С. 169–172.
  8. *Госсард Э. Э., Хук У. Х.* Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
  9. *Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф.* Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса // Космічна наука і технологія. — 2005. — **11**, № 5/6. — С. 22–29.
  10. *Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф.* Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2005. — **10**, № 10. — С. 39–49.
  11. *Сомсиков В. М.* Солнечный терминатор и динамика атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1983. — 192 с.
  12. *Сомсиков В. М.* Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. — 1991. — **31**, № 1. — С. 1–12.
  13. *Сомсиков В. М.* О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэрономия. — 1992. — **32**, № 3. — С. 55–59.
  14. *Сомсиков В. М., Троицкий Б. В.* Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. — 1975. — **15**, № 5. — С. 856–860.
  15. *Черногор Л. Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59–106.
  16. *Черногор Л. Ф.* Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. — 2006. — **4**, № 12. — С. 655–697.
  17. *Черногор Л. Ф.* Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. — 2007. — **5**, № 4. — С. 55–97.
  18. *Черногор Л. Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — **48**, № 5. — С. 681–702.
  19. *Черногор Л. Ф.* Флуктуации геомагнитного поля вблизи г. Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. — 2009. — **49**, № 3. — С. 403–415.
  20. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 29–38.
  21. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 92–99.
  22. *Черногор Л. Ф., Шамота М. А.* Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 6. — С. 89–98.
  23. *Чернышева С. П., Шефтель В. М., Шаренская Э. Г.* Неоднородности электронной концентрации в межслоевой области ионосферы и внутренние гравитационные волны, генерируемые при движении в атмосфере солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. — 1976. — **16**, № 5. — С. 809–814.
  24. *Afraimovich E. L.* First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // Earth Planets Space. — 2008. — **60**. — P. 895–900.

Надійшла до редакції 31.08.09

*L. F. Chernogor, M. A. Shamota*

GEOMAGNETIC PULSATIONS  
ASSOCIATED WITH SOLAR  
TERMINATORS NEAR KHARKIV CITY.  
1. SPECTRAL ANALYSIS

The database of geomagnetic pulsations associated with the dawn and dusk terminators near Kharkiv city during the years 2002–2008 in the 1–1000 s period interval was collected and analyzed. The spectral analysis revealed quasi-periodic disturbances caused by the terminators and produced disturbance parameters. The disturbance periods turn out to be in the interval from 9 to 11 min with durations of 45–55 min and amplitudes of 3–5 nT. The response to the dawn and to the dusk terminators shows a delay of 30–40, 80–90 min and of 60–80 min, respectively.

УДК 621.396

**В. А. Пуляев, И. Ф. Домнин, Д. А. Дзюбанов**

Институт ионосферы Национальной академии наук и Министерства освіти і науки України, Харків

## **КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КОНСТАНТЫ РАДИОЛОКАТОРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

---

*Пропонуються алгоритмічні процедури, призначені для мінімізації похибок обчислень електронної концентрації іоносферної плазми. Для їхнього функціонування запропоновано методіку аналізу зміни рівня космічного фону на вході радара некогерентного розсіяння. За допомогою цієї інформації можна здійснювати контроль технічного стану приймально-передатальної системи, що дозволяє проводити своєчасну корекцію константи радара та уточнювати електронну концентрацію без залучень даних іонозонда.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ионосфера чутко реагує на зміни в геофізических оболочках — літосфері, атмосфері, магнітосфері — при впливі на них різних природних і техногенних факторів. Наблюдення за станом іоносфери в діапазоні висот від 100 км до 1500 км [3, 4] здійснюються в отриманні висотно-часових розподілів параметрів середовища, таких як електронна концентрація  $N_e(h, t)$ , електронна температура  $T_e(h, t)$ , іонна температура  $T_i(h, t)$ , дрейф плазми  $V_{др}(h, t)$ , газовий склад  $v(h, t)$  і др. При оцінці стану космічної погоди всі вони дають можливість розглянути і проаналізувати величезний обсяг геофізическої інформації. Ця інформація успішно використовується багатьма службами при урахуванні особливостей сонечно-земних зв'язів, при коректурі і апробації створюваних моделей середовища, в якому поширюються радіохвилі, при розробці стратегії підвищення надійності функціонування чутливої радіоапаратури, використовуваної в складі наземних, повітряних і космічних об'єктів.

Одним з найбільш інформативних методів, що дозволяють отримувати одночасно всі на-

бор перерахованих параметрів, є метод некогерентного розсіяння (НР) радіохвилі [14]. Він здійснюється з допомогою унікальних радіолокаційних установок — радарів НР, розміщених на території ряду країн [1, 12]. Особливістю отримання абсолютних значень електронної концентрації є те, що при розрахунках зазвичай використовується процедура калібрування профілю потужності розсіяного сигналу. Для цього привабливою є інформація з найближчих станцій вертикального зондування (іонозондів [5]), о критичній частоті шару F2. Однак складність ситуації полягає в тому, що в час іоносферних збурень, при виникненні спорадических шарів E<sub>s</sub>, а також при виході іонозонда з ряду отримати дані про критичній частоті неможливо, що призводить до втрати інформації в дорожчому радіофізическому експерименті.

Однією з можливостей виходу з цієї ситуації є те, що для процедур розрахунку висотно-часових залежностей електронної концентрації перед початком експерименту визначається чисельний показувальник, що означає назву «константа радара» [14] і відображає стан основних його систем. Розуміється, що за весь час експерименту, який може тривати від кількох годин до

нескольких суток, он заменит отсутствующую информацию о критической частоте.

Проблема состоит в том, что в процессе эксплуатации технические характеристики и режимы работы систем радиолокатора изменяются, а это приводит к «уходу» текущих значений константы от её расчётных значений. И хотя предпринимаются меры по учёту таких особенностей, однозначной компенсации аппаратурных изменений добиться не удаётся, а результаты наблюдений иногда оказываются недостоверными, т. е. возможен срыв запланированного эксперимента.

Цель этой работы — показать возможность минимизации погрешности определения электронной концентрации за счёт контроля и последующей коррекции значений константы радиолокатора без привлечения данных ионозонда. Эта возможность состоит в том, что для минимизации погрешности предполагается использовать сведения об уровне мощности шума на входе радара НР, в том числе и входящего в его состав космического фона.

Рассмотрим эту возможность подробнее.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что основные успехи в понимании физических процессов, происходящих в ионосфере, были достигнуты в конце 1950-х гг. в результате внедрения новых методов её радиолокационного зондирования. Эксперименты, выполненные Э. Эплтоном и А. Барнеттом, Ж. Брейтом и М. Тьювом, базировались на наблюдении радиосигнала с частотой  $f$  при его отражении от ионосферы. Появление отражения с высоты  $h$  свидетельствовало о выполнении условия  $f = f_N$ , где  $f_N$  — плазменная частота:

$$f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}}, \text{ Гц.} \quad (1)$$

Здесь  $N_e$  — электронная концентрация ( $\text{м}^{-3}$ ),  $e = 1.68 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона,  $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  кг — масса электрона,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Если  $f_N$  выразить в мегагерцах, выражение (1) примет вид хорошо известного соотношения  $f_N = 8.97 \cdot 10^{-6} \sqrt{N_e}$

Одной из особенностей работы ионозонда (импульсного локатора с частотной разверткой), является то, что он может изменять частоту  $f$  излучаемого сигнала от 2 до 20 МГц и по отраженному сигналу получать распределение электронной концентрации вплоть до высоты максимума слоя F2, на которой электронная концентрация равна  $N_{eF2} = 1.24 \cdot 10^{10} f_{F2}^2$ . Ионизированные же области, расположенные выше максимума (выше 200 ... 300 км), не удается исследовать с поверхности Земли методом вертикального зондирования.

Для получения сведений о распределении электронной концентрации  $N_e(h)$  на высотах выше максимума используется радиолокационная система, которая позволяет всё же «видеть» рассеянный сигнал, приходящий от верхней ионосферы. Для этого применяют зондирующие радиопульсы, излучаемые в диапазоне метровых или дециметровых волн. Применение таких сигналов лежит в основе метода некогерентного рассеяния [14].

В этом случае для расчёта  $N_e(h)$  вначале оценивается высотное распределение мощности  $P_S(h)$  сигнала рассеяния. При этом используется радиолокационная аппаратура в следующем составе: а) радар НР, с помощью которого в каждом сеансе измерений (при статистическом усреднении результатов за время единиц-десятков минут) возможен расчёт высотного распределения как мощности сигнала рассеяния, так и коэффициентов корреляции флуктуаций электронной плотности [7]; б) расположенный вблизи ионозонд, привлекаемый в качестве независимого дополнительного средства для непрерывного предоставления в процессе эксперимента текущих значений критической частоты  $f_{F2}$ .

Такой подход для получения  $N_e(h)$  носит название метода «профиля мощности» [14, 15]. Суть его в том, что по корреляционной функции рассеянного сигнала, путем решения обратной задачи рассеяния [6, 10] определяется высотная зависимость температур заряженных частиц ионосферной плазмы: электронов  $T_e(h)$  и ионов  $T_i(h)$ . А полученные результаты, из которых выбирается информация о параметрах среды на высоте  $h_{F2}$ , дают возможность рассчитать нор-

мированный профиль электронной концентрации как [10]

$$N_e(h)|_h = \frac{P_S(h)h^2[1+T_e(h)/T_i(h)]}{P_S(h_{F2})h_{F2}^2[1+T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]},$$

где  $h$  — текущая высота,  $h_{F2}$  — высота максимума электронной концентрации, на которой  $N_e(h)/N_e(h_{F2})=1$ ,  $P_S(h_{F2})$ ,  $T_e(h_{F2})$  и  $T_i(h_{F2})$  — параметры, относящиеся к участку на высоте максимума.

Получив по данным ионозонда абсолютное значение электронной концентрации  $N_{eF2}$  на высоте максимума профиля F2, абсолютные значения для всего высотного распределения  $N_e(h)$  можно найти как

$$N_e(h) = N_e(h)|_h N_{eF2}.$$

Подобная реализация радиофизического эксперимента, при всей сложности комплексной работы технических систем, значительных энергетических затратах, приводит к усложнению обстановки в радиоэфире при работе ионозонда, который излучает в довольно широком диапазоне частот. Кроме того, имеют место значительные погрешности расчёта критической частоты  $f_{F2}$  при прохождении терминатора, а также есть риск потери сведений ионозондом из-за магнитовозмущённых условий в ионосфере.

Есть ещё один способ, описанный в работе [14], базируется на совместной работе радара НР с ионозондом. При этом значения электронной концентрации  $N_{eF2}$  предполагается получать лишь эпизодически, в спокойных дневных ионосферных условиях, а в паузах между включениями ионозонда использовать константу

$$C = \frac{P_S(h_{F2})h_{F2}^2[1+T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{N_{eF2}}.$$

Константа радиолокатора  $C$  позволяет рассчитывать электронную концентрацию при отсутствии текущих значений  $f_{F2}$ :

$$N_e(h) = \frac{P_S(h)h^2[1+T_e(h)/T_i(h)]}{C}. \quad (2)$$

Как уже отмечалось выше, при таком использовании константы  $C$  в любой момент ее текущее значение может отличаться от рассчитанно-

го перед началом работы. Уточнять же константу, прерывая при этом зачастую уникальный эксперимент, недопустимо.

Из всего изложенного следует, что из-за возможности отличия текущего значения константы  $C$  от значения, определённого в начале эксперимента, крайне необходим способ надежного контроля и методика коррекции этого показателя, чтобы избежать ошибок в расчётах электронной концентрации.

Как один из выходов в структуру радара могут быть введены дополнительные блоки для формирования контрольного сигнала, направляемого в антенну радара с целью его приёма и обработки. Ниже мы предлагаем менее трудоёмкий вариант — использовать уже имеющуюся информацию, а именно ту, которая содержится в характере изменения составляющих шума  $P_N(t)$  на входе радара.

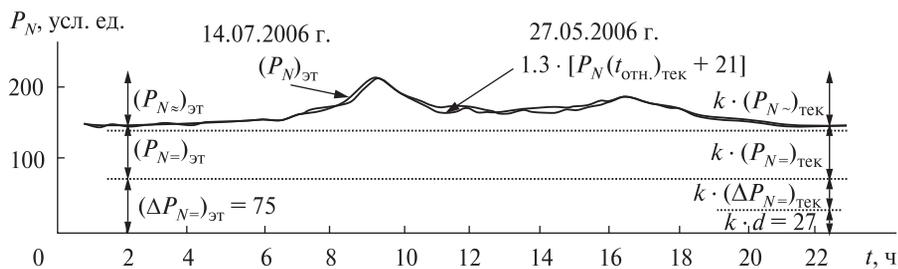
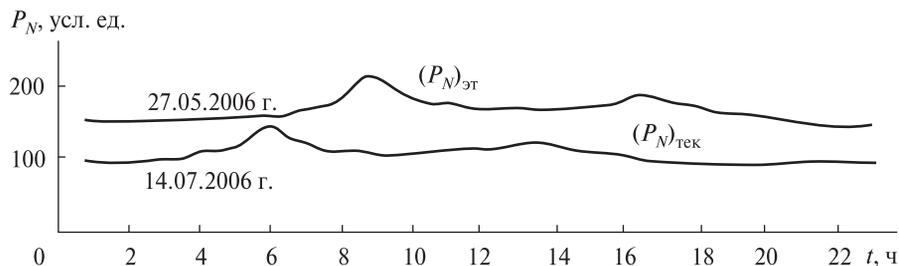
Рассмотрим подробнее, какую информацию несут в себе суточные изменения уровня составляющих шума, и покажем пути её использования для дополнительного контроля и уточнения рассчитанных значений электронной концентрации.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Одной из особенностей метода НР является то, что в системе обработки регистрируется смесь  $P_{S+N}(h)$ , содержащая как полезный сигнал рассеяния  $P_S(h)$ , так и почти всегда превышающий его по уровню фоновый шум  $P_N(t)$ , интенсивность которого обычно оценивается в конце радиолокационной развертки дальности.

Как известно, появление фонового шума в радарах НР обусловлено внешними и внутренними факторами [2]. Так, с внешними факторами связано наличие в луче радара космических сигналов, в том числе и от групп звездных скоплений (все они совместно с Солнцем и галактической средой образуют так называемый космический фон). Когда эта составляющая принимается неподвижной приёмной антенной, то в зависимости от времени суток она дает вклад в эффективную шумовую температуру  $T_N$ , изменяющийся от нескольких десятков до нескольких сотен градусов. В состав фонового шума

**Рис. 1.** Значения мощности  $P_N$  шума, полученные в процессе исследования ионосферы над Харьковом за период с 27 мая по 6 июня и 14 июля 2006 г.



**Рис. 2.** Сопоставление переменных составляющих мощности шума для текущего и эталонного дней с учётом их приведения во времени и итерационного подбора коэффициентов  $k$  и  $d$

входят и другие сигналы, которые оказываются в зоне диаграммы направленности антенны (грозовые разряды, отражения и радиотепловые шумы от земной поверхности, которые приняты боковыми лепестками и т. д.).

Внутренние же факторы обуславливают появление аддитивной составляющей, связанной с шумовым характером работы радиоэлементов радара. Такая составляющая отражает текущее техническое состояние его аппаратуры и образует добавку к шумовой температуре  $T_N$  также на уровне нескольких сотен градусов.

Как показывает анализ, значения мощности этих составляющих фонового шума можно использовать для предложенного выше контроля значений константы  $C$ . К примеру, для ориентированной в зенит антенны харьковского радара НР имеются зафиксированные суточные зависимости уровня фонового шума  $P_N(t)_{ЭТ}$ , как добавки к сигналу рассеяния, после статистического усреднения данных за период 27 мая — 6 июня 2006 г. (рис. 1). Отметим, что при усреднении каждая последующая суточная линия корректировалась (сдвигалась влево на  $1/365$  часть суток, или около 4 мин), т. е. приводилась по времени к состоянию на 27 мая 2006 г., поэтому в дальнейших расчётах этот день нами будет рассматриваться в качестве эталонного. Так-

же на графике приведен фоновый шум, полученный в текущих сутках 14 июля 2006 г., с использованием которого будет приведён пример уточнения значений электронной концентрации.

На радиолокаторах в других географических пунктах можно наблюдать аналогичный характер временных зависимостей фонового шума. Обычно имеют место два максимума и два минимума, что связано с движением луча антенны по небесной сфере (со сменой в зоне луча групп наблюдаемых звёздных радиоисточников).

Дальнейший анализ данных позволяет разложить фоновый шум на три интересующие нас составляющие [11] (см. рис. 2).

1. Первая составляющая, переменная величина  $P_{N\sim}(t)_{ЭТ}$ , образуется за счёт космического фона. Соотношение между значениями локальных максимумов и минимумов на этой кривой напрямую связано с коэффициентом усиления приёмной системы радиолокатора.

2. Вторая составляющая  $(\Delta P_{N=})_{ЭТ}$  образуется из сигнала, отражаемого от земли и принимаемого боковыми лепестками диаграммы направленности антенны. Это отражение возникает в момент включения передатчика и зависит от уровня излучаемой мощности радара. Например, при включении и выключении передатчика 27 мая 2006 г. харьковский радиолокатор регист-

рировал появление дополнительной шумовой добавки  $(\Delta P_{N=})_{\text{ЭТ}}$  на уровне 75 условных единиц (уровней квантования в квадрате), что составляет 25...30 % от общего фона.

3. Третья составляющая  $(P_{N=})_{\text{ЭТ}}$  образуется радиотепловыми шумами земной поверхности, а также зависит от состояния радиокомпонентов схем. На данном этапе исследований уровень этой составляющей принимается постоянным.

Для решения нашей задачи предлагается контролировать значения всех трех составляющих на протяжении некоторого временного интервала  $T$  и проводить периодические уточнения константы с последующей коррекцией значений электронной концентрации. В отличие от традиционных методов радиоастрономии [13], предполагается контролировать не абсолютные значения мощности выбранного в качестве эталона контрольного сигнала, а соотношение между значениями мощности космического фона в разнесённые моменты времени (в точках минимума и максимума).

Суть такой коррекции заключается в следующем (см. рис. 2).

1. Определяется отличие размахов в точках глобального минимума и максимума шума  $P_N(t)_{\text{ТЕК}}$  в текущий день. Вычисляется отношение к такой же разнице, полученной из размаха  $P_N(t)_{\text{ЭТ}}$  в эталонный день. Так как это отношение отражает, насколько изменился с момента эталонных суток коэффициент усиления приёмной системы, то это значит, что во столько же раз изменилось усиление и полезной составляющей — мощности  $P_S(h)_{\text{ЭТ}}$  сигнала рассеяния (а значит, и константы).

2. Анализируется уровень третьей составляющей  $(\Delta P_{N=})_{\text{ТЕК}}$  и оценивается его приращение по отношению к уровню составляющей эталонного дня. Изменение уровня (константы) показывает, насколько изменилась мощность  $P_S(h)_{\text{ЭТ}}$  возвращаемого сигнала рассеяния, но уже из-за нестабильной работы передатчика радиолокатора или флуктуаций питающих его напряжений.

3. С помощью полученных сведений константа  $C_{\text{ЭТ}}$  преобразовывается в значение  $C_{\text{ТЕК}}$ , соответствующее изменённым характеристикам состояния радара, и с помощью выражения (2)

уточняются значения электронной концентрации.

**Практическая реализация** данной методики заключается в выполнении следующих операций.

*Шаг 1.* Значения текущей мощности шума  $P_N(t)_{\text{ТЕК}}$  пересчитываются на момент эталонных суток путем циклического сдвига данных вдоль оси времени на значение  $t = t_{\text{ОТН}}$ , эквивалентное разнице между календарными датами. Затем реализуется процедура поэлементного сравнения этой отнесённой мощности  $P_N(t_{\text{ОТН}})_{\text{ТЕК}}$  с эталонной мощностью  $P_N(t)_{\text{ЭТ}}$ . Для этого предлагается итерационная процедура вида [8]

$$\Delta(k, d) = \sum_{t=0}^T \{P_N(t)_{\text{ЭТ}} - k[P_N(t_{\text{ОТН}})_{\text{ТЕК}} + d]\}^2 \Rightarrow \min,$$

в процессе выполнения которой анализируются суммы средних квадратичных отклонений  $\Delta(k, d)$  линий, где  $T$  — рассматриваемый период корректируемых суток,  $k = 0.5 \dots 2.0$  — диапазон подбора коэффициента усиления приёмной системы радара,  $d = -50 \dots +50$  — диапазон подбора коэффициента, отражающего изменение рабочего состояния передатчика.

*Шаг 2.* По окончании процедуры итераций (по найденному минимуму  $\Delta$ ) устанавливается, что если бы при данном состоянии аппаратуры определялась константа  $C_{\text{ЭТ}}$ , то с высоты максимума слоя F2 был бы принят уровень мощности сигнала рассеяния  $P_S(h_{F2})_{\text{ТЕК}}$ , равный иному значению, а именно:

$$P_S(h_{F2})_{\text{ТЕК}} = \frac{P_S(h_{F2})_{\text{ЭТ}}}{k}.$$

*Шаг 3.* С учётом появившейся добавки  $d$  определяется величина изменения мощности излучения передатчика, равная [9]

$$m = \frac{(\Delta P_{N=})_{\text{ЭТ}} - kd}{(\Delta P_{N=})_{\text{ЭТ}}} = 1 - \frac{kd}{(\Delta P_{N=})_{\text{ЭТ}}}.$$

*Шаг 4.* Полученные коэффициенты можно использовать для уточнения текущих значений константы  $C_{\text{ТЕК}}$  согласно выражению

$$C_{\text{ТЕК}} = C_{\text{ЭТ}} \frac{m}{k} = \frac{C_{\text{ЭТ}}}{k} \left[ 1 - \frac{k \cdot d}{(\Delta P_{N=})_{\text{ЭТ}}} \right].$$

Высотно-временные значения электронной концентрации за период  $T$  корректируются с использованием формулы

$$N_e(h, t)_{\text{корр}} = N_e(h, t) \frac{C_{\text{эт}}}{C_{\text{тек}}}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Предложенный вариант обработки представлен на рис. 2, где демонстрируется момент совмещения значений переменных составляющих  $P_{N\sim}(t)_{\text{тек}}$  и  $P_{N\sim}(t)_{\text{эт}}$ . Результаты расчётов в итерационной процедуре для этого случая следующие: а) коэффициент передачи приёмника в текущий день оказался меньше эталонного в  $k = 1.3$  раза; б) передатчик радара в это же время работал с меньшей ( $m = 1 - 21/75 = 0.7$ ) мощностью излучения. Согласно такой ситуации с целью коррекции необходимо пересчитать полученные значения электронной концентрации 14 июля 2006 г., а именно: умножить их на 1.3 из-за использования радара с уменьшённым коэффициентом передачи приёмного тракта, а также ещё раз умножить на  $1/0.7 = 1.43$  из-за сниженной мощности радиопередающего устройства.

## ВЫВОДЫ

Методика коррекции результатов измерений электронной концентрации ионосферной плазмы, представленная здесь, позволяет производить уточнение параметров ионосферы в те периоды, когда с момента предыдущего расчёта константы в состоянии технических систем радара НР произошли изменения. Предложенный в данной работе алгоритм коррекции результатов измерений, осуществляемый в случае отсутствия данных о критической частоте со станций вертикального зондирования, возможен благодаря анализу информации о характере поведения шумовых составляющих (в особенности космического фона), регистрируемых на входе радиолокатора, и позволяет, как показывает практика измерений, значительно улучшить численные показатели расчётов.

Предложенная коррекция даёт возможность вернуться к результатам измерений, проведён-

ным в предыдущие периоды, чтобы проверить корректность значений использованной в то время константы. Для этого необходимо сопоставить уровень шума тех дней со значениями шума эталонного дня, найти отличия и скорректировать результаты вычислений. Такая проверка приводит к уменьшению допущенных погрешностей расчётов электронной концентрации и повышает достоверность радиофизического эксперимента.

Следует также помнить, что уровень космического фона при приёме сигнала изменяется в зависимости от интенсивности ионосферного поглощения (наибольшее поглощение — в летний день). Согласно предложенной методике сравниваются уровни фона хотя и для разных суток, но в одно и то же время суток, поэтому неточности в расчёты будут вносить лишь сезонные отличия интенсивностей поглощения. Мы рекомендуем использовать не один, а несколько эталонных значений  $P_{N\sim}(t)_{\text{эт}}$  для этих случаев.

Рассмотренная выше процедура используется в процессе ионосферных исследований, осуществляемых с помощью радара НР Института ионосферы НАН и МОН Украины (г. Харьков).

1. Абрамов В. Г., Жеребцов Г. А., Заворин А. М. Радар некогерентного рассеяния ИСЗФ СО РАН // Материалы региональной научной конференции, посвященной 100-летию изобретения радио. — Иркутск, 1995. — С. 16—20.
2. Головин В. И., Рогожкин Е. В., Таран В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода НР. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности // Вестн. Харьков. политехн. ин-та. — 1979. — № 155, вып. 1. — С. 12—22.
3. Григоренко Е. И., Боговский В. К., Емельянов Л. Я. и др. Вариации параметров ионосферы в периоды высокой и низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2001. — 41, № 2. — С. 199—203.
4. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 1. — С. 44—58.
5. Лысенко В. Н., Склярів І. Б. Перспективи применения ионозонда в составе радара НР Института ионосферы // Вестн. НТУ «ХПИ». — 2004. — № 23. — С. 63—68.

6. Мазманишвили А. С., Пуляев В. А. Разработка информационных технологий оценки параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 4. — С. 73—78.
7. Мазманишвили А. С., Пуляев В. А. Распределение корреляционного функционала при точечном измерении данных // Изв. вузов. Радиофизика. — 2004. — 47, № 9. — С. 789—797.
8. Пат. Украины UA № 24531, МКИ G 01 S 13/95. Способ определения высотно-временного распределения электронной концентрации ионосферной плазмы при нестабильности константы радиолокатора / В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. — Заявл. 01.12.06; Опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.
9. Пат. Украины UA № 27311, МКИ G 01 S 13/95. Способ определения высотно-временного распределения электронной концентрации ионосферной плазмы / В. А. Пуляев, В. Н. Лысенко. — Заявл. 15.06.07; Опубл. 25.10.07, Бюл. № 17.
10. Пуляев В. А. Оценка параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. — 2003. — 5(5). — С. 12—14.
11. Пуляев В. А. Оценка критической частоты слоя F2 с помощью константы радиолокатора НР // Вестн. НТУ «ХПИ». — 2007. — № 10. — С. 162—165.
12. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом НР // Геомагнетизм и аэрономия. — 2001. — 41, № 5. — С. 659—666.
13. Цейтлин Н. М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. — М.: Сов. радио, 1966.— 360 с.
14. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // Тр. ИИЭР. 1969. — 57, № 4. — С. 139—175.
15. Evans J. V. Studies of the F region by the incoherent backscatter method. — Lexington, M. I. T. Lincoln Lab., 1962. — Mass. Tech. Rept. 274.

Надійшла до редакції 03.07.09

V. A. Pulyayev, I. F. Domnin, D. A. Dzubanov

#### CORRECTION OF AN ESTIMATE FOR ELECTRON CONCENTRATION OF IONOSPHERIC PLASMA AT INSTABILITY OF THE CONSTANT OF THE INCOHERENT SCATTER RADAR

We propose algorithmic procedures for the minimization of calculation errors in the electron concentration of ionospheric plasma. The technique for power analysis of space background at the input of the incoherent scatter radar is developed for these algorithms. This information enables one to control the transceiver system condition, which permits one to correct the radar constant and to improve the value of electron concentration without ionoprobe data.

УДК 533.951

**А. Н. Кришталь, С. В. Герасименко, А. Д. Войцеховская, А. А. Соловьев**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## **К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАННЕЙ СТАДИИ ВСПЫШЕЧНОГО ПРОЦЕССА**

---

*Досліджено умови появи нестійкості високочастотних електронних ленгмюрівських хвиль у плазмі поблизу основи петельної структури на ранній стадії спалахового процесу в активній області на Сонці. Процес виникнення і розвитку нестійкості визначається сукупною дією таких факторів, як наявність у струмовому контурі петлі слабого великомасштабного електричного поля, вплив парних кулонівських зіткнень, втрата імпульсу електронами на пульсаціях розвиненої бернштейнівської турбулентності, а також загасання Ландау. Вважалося, що поблизу основи петлі, — в області «кілогауссових» магнітних полів, — густина і температура плазми визначається за допомогою напівемпіричної моделі сонячної атмосфери FAL (Fontenla-Avrett-Loeser), що враховує вплив процесу дифузії гелію. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами аналогічних розрахунків для альтернативних моделей сонячної атмосфери MAVN (Machado-Avrett-Vernazza-Noyes) та VAL (Vernazza-Avrett-Loeser).*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ленгмюровские волны играют чрезвычайно важную роль в физических процессах, происходящих в токовых слоях плазмы солнечной атмосферы [1, 4, 5, 10]. Среди кинетических неустойчивостей, приводящих к возбуждению ленгмюровских волн, чаще всего рассматривают неустойчивость пучка электронов в плазме [2, 10, 12]. Согласно классическому сценарию развития неустойчивости данного типа [2, 5, 9, 12, 17] линейная стадия при благоприятных условиях может перейти в стадию слабой, а затем и сильной турбулентности. При этом образование крупномасштабных областей с низкой плотностью плазмы (плазменного конденсата) можно трактовать как появление низкочастотной турбулентности на фоне высокочастотной ленгмюровской. Во всех возможных вариантах теории данного явления [1, 2, 5, 9, 10, 12, 17] получается один и тот же результат, наиболее важ-

ный для астрофизических приложений: в результате развития модуляционных возмущений энергия плазменных волн из области конденсата начинает перекачиваться в область больших волновых чисел, аналогично поведению турбулентности в гидродинамике. При развитой ленгмюровской турбулентности, когда имеются волны различных масштабов, процесс ускорения частиц носит диффузионный характер. Высокочастотная ленгмюровская турбулентность может ускорить только относительно быстрые частицы именно потому, что фазовые скорости плазмонов превышают тепловую скорость электронов. В режиме слабой турбулентности, пока идет процесс накопления энергии волн в области конденсата, ускорение частиц относительно невелико, однако процесс ускорения становится намного эффективнее при переходе в стадию сильной турбулентности. Согласно некоторым оценкам [9, 10, 12, 17, 19] почти 90 % энергии турбулентности переходит к быстрым частицам. Так могут образовываться «хвосты» энергичных частиц [1, 17]. В модели вспышки ХПР (Хейвартса — Приста — Раста) [14], где ди-

---

© А. Н. КРИШТАЛЬ, С. В. ГЕРАСИМЕНКО,  
А. Д. ВОЙЦЕХОВСКАЯ, А. А. СОЛОВЬЕВ, 2009

намика вспышечного процесса определяется взаимодействием двух магнитных потоков — «старого», наличного в аркаде, и «нового», всплывающего из-под фотосферы, — неустойчивость высокочастотных ленгмюровских волн и ленгмюровская турбулентность, которая может из нее развиться, появляются, как правило, только на заключительной фазе процесса, что в основном подтверждается и данными наблюдений [1, 5, 9, 12, 17, 19]. Возникновение высокочастотной ленгмюровской турбулентности, формирующей в послевспышечной плазме «хвосты» энергичных частиц, подтверждается результатами лабораторного моделирования процесса вспышки [1, 9, 10] и проявляется в виде возникновения ленгмюровских сателлитов ( $+\omega_{pe}$  и  $-\omega_{pe}$ ) у известных линий излучения [3].

Здесь  $\omega_{pe} = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}$  — плазменная электронная частота.

Если иметь в виду конкретно петельные структуры в АО, то исходная высокочастотная ленгмюровская неустойчивость в плазме петли имеет откровенно «пучковый» характер и, согласно все тому же классическому сценарию [4], может быть вызвана пучком энергичных электронов, который формируется в петле после импульсной («флэш») фазы [1, 17, 19].

Обнаружение в первой половине 1980-х гг. дополнительного штарковского уширения линий бальмеровской серии с большими ( $N \geq 8$ ) номерами [12] стало первым (и главным) экспериментальным подтверждением наличия в петлях АО крупномасштабного слабого электрического поля. Еще одним существенным (правда, косвенным) подтверждением можно считать значительный прогресс, достигнутый в моделировании вспышечного процесса с помощью модели петли типа «электрический контур» [1, 5, 17, 19]. В работах [6–8] было показано, что наличие такого «субдрейсеровского» поля [17] наряду с имеющейся неоднородностью плазмы и с учетом процессов диссипации может кардинальным образом повлиять на весь ход вспышечного процесса, поскольку еще до наступления фазы «предварительного нагрева» в предвспышечной плазме петли возможно появление

целого набора мелкомасштабных неустойчивостей низких и высоких частот. При наличии благоприятных условий каждая из них может дать начало соответствующей слабой, а потом, возможно, и сильной турбулентности, формирующей тем самым необходимые условия для образования высокотурбулентных токовых слоев (ВТТС) [10]. Как было показано в работах [6–8], среди этих неустойчивостей есть и высокочастотная ленгмюровская. Однако она весьма существенно отличается от своего «классического» аналога [1, 5, 12, 17]. Она является, во-первых, «довспышечной», а во-вторых, «непучковой», поскольку до начала вспышки на нижнехромосферном участке токового контура петли единственными высокоэнергичными частицами могут быть только так называемые «убежавшие» электроны [1, 2, 12], которые не оформлены в пространственно ограниченный пучок, и процент которых в исследуемой области пренебрежимо мал [6–8]. Очевидно, что непосредственное наблюдение подобной мелкомасштабной турбулентности удаленным наблюдателем на линейной стадии ее развития невозможно. Реально могут быть только косвенные свидетельства ее наличия в плазме петли. В одном случае исследуемая неустойчивость может достаточно быстро развиться в насыщенную ленгмюровскую турбулентность, и тогда у «хромосферных» линий излучения появятся ленгмюровские сателлиты  $\omega_0 - \omega_{pe}$  и  $\omega_0 + \omega_{pe}$  (здесь  $\omega_0$  — частота основной линии); в настоящее время их обнаружение вряд ли осуществимо, однако в принципе возможно [3, 12, 17]. В другом случае на более ранней стадии может проявиться низкочастотная турбулентность на фоне высокочастотной ленгмюровской. Образуются крупномасштабные области с пониженной плотностью плазмы, что можно трактовать как увеличение характерного масштаба турбулентности. Проявление такой турбулентности можно наблюдать по уширению линий при одном очень существенном дополнительном условии, а именно, что наблюдателю повезет вообще наблюдать предвспышечное состояние в АО. Самое удивительное заключается в том, что такие уникальные наблюдения действительно имеются.

В работе [13] в качестве индикатора возникновения предвспышечной турбулентности в АО было предложено рассматривать существенное увеличение так называемой нетепловой скорости  $v_{nt}$  (nonthermal velocity), определяемой соотношением

$$v_{nt} = \sqrt{\frac{2k_B(T_D - T_e)}{m_i}}, \quad (1)$$

где  $T_D$  — доплеровская температура, определяемая по полной ширине наблюдаемой линии,  $T_e$  — электронная температура, определяемая методом отношения линий [3,13],  $m_i$  — масса иона [13]. Эту величину необходимо было определить до вспышки (фоновое значение), проследить ее увеличение до вспышечного максимума, спад до «предвспышечного» минимума и снова увеличение до второго максимума. Тогда заметные изменения величины  $v_{nt}$  во временном интервале между двумя максимумами и представляют собой свидетельство существования предвспышечной турбулентности в АО. При этом надо быть уверенным в том, что космический аппарат (в случае [13] это был Yohkoh) наблюдает одну и ту же АО. Для этого необходимо было зафиксировать две вспышки в одной и той же активной области на протяжении одной и той же орбиты аппарата. Такая редкая возможность и представилась 3 октября 1993 года в АО 7590. Опуская детальное изложение результатов [13] и предложенную физическую интерпретацию, отметим только наиболее важные моменты. Временной интервал между вспышками «А» и «В» в АО 7590 составил приблизительно 18 минут, причем началу импульсной фазы каждой вспышки соответствовал четко фиксируемый всплеск жесткого рентгеновского излучения. Электронная температура, равно как и кривая блеска, на протяжении этого временного интервала изменялись весьма незначительно, в то время как  $v_{nt}$  изменилась почти в три раза (от 33.5 до 100 км/с). Таким образом, исследования [13] показали, что предвспышечная турбулентность в АО, фиксируемая по дополнительному уширению линий излучения, возможна. Авторы работы [13] связывают ее с пространственными изменениями, происходившими во вспышеч-

ном комплексе АО 7590 при вспышке магнитного потока из-под фотосферы.

### «УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ» ПРЕДВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ И ИНКРЕМЕНТ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Полуэмпирическая модель солнечной атмосферы FAL (Fontenla-Avrett-Loeser) была разработана в 1990—1993 гг. [11]. В серии работ (см. ссылки в [11]) были изложены математические основы предложенной концепции и представлены результаты расчетов энергетического баланса для гидростатических моделей (A, C, F и P) солнечной переходной области. Эта область характеризуется аномально большими значениями температурного градиента по высоте и представляет собой промежуток между горячим корональным веществом с температурой порядка  $10^6$  К и гораздо более холодным хромосферным веществом с температурой  $10^4$  К и ниже. Она видна как узкий светящийся ободок на солнечном лимбе. В процессе моделирования ставилась цель сбалансировать потери на излучение из переходной области с полным потоком энергии, направленным из короны «вниз» в хромосферу, причем баланс этот должен иметь место на любой высоте в переходной области [11]. В указанных моделях A, C, F и P тщательнейшим образом учитывается диффузия частиц (в данном случае описываемая скоростью амбиполярной диффузии), включая отклонения от локального ионизационного равновесия и передачу энергии ионизации. В начальных работах цикла авторы модели FAL добились хорошего совпадения водородного спектра с реально наблюдаемыми интенсивностями и профилями линий  $\text{Ly } \alpha$  и  $\text{Ly } \beta$ . В этих работах они достигли хорошего совпадения рассчитанных и реально наблюдаемых пространственных вариаций указанных линий. Последующие их работы были посвящены детальному обсуждению и анализу основных используемых приближений — пространственной «одномерности» и гидростатического равновесия. Последняя работа цикла [11] посвящена расчету излучения гелия при учете диффузии. Были получены оценки для транс-

портных коэффициентов из кинетической теории при отклонении содержания гелия от равновесных значений, соответствующих локальному ионизационному балансу. Спектры гелия были рассчитаны для каждой из моделей (А, С, F и P), при этом оценивалась роль гелия в передаче энергии (из короны в переходную область). Были исследованы эффекты «корональной подсветки» и их влияние на структуру переходной области и верхней хромосферы, а также влияние «корональной подсветки» на различные ультрафиолетовые линии и линию излучения нейтрального гелия He I  $\lambda$  1083 нм. Проведенное детальное сравнение абсолютных интенсивностей и профилей линий показало, что упомянутые модели дают хорошее совпадение не только для спектра водорода, но и для спектра гелия [11]. Последний факт безусловно отражает значительный прогресс в моделировании атмосферы активной области и диагностике предвспышечной плазмы. В модели FAL, как и во всех остальных полуэмпирических моделях [5, 16, 21], в числе прочих характеристик оцениваются значения температуры и плотности плазмы как функции высоты.

Таким образом, если рассматривать высоту  $h$  над уровнем фотосферы как параметр, то связанные им пары значений плотности и температуры образуют своеобразное «уравнение состояния» плазмы [6–8]. Проведенные ранее исследования устойчивости высокочастотных ленгмюровских волн с «уравнениями состояния» MAVN и VAL [6,7] выявили высокую чувствительность инкремента к изменениям температуры и плотности. Поэтому изучение поведения инкремента в плазме с «уравнением состояния» FAL [11] можно рассматривать еще и как исследование влияния процесса диффузии гелия на развитие ленгмюровской неустойчивости. Выражение для «ленгмюровского» инкремента при наличии в предвспышечной плазме внешнего электрического поля и учета процессов диссипации было получено ранее с помощью метода Пайнса — Шриффера [18] и уже использовалось для исследования устойчивости ленгмюровских волн в плазме с «уравнениями состояния» MAVN [16] и VAL [21]. В еди-

ницах электронной плазменной частоты  $\omega_{pe}$  оно имеет следующий вид [6, 7]:

$$\Gamma \equiv \frac{\delta}{\omega_{pe}} = \frac{1+k_L^2}{2(1+7k_L^2)} \times \left\{ \frac{v_{эф}}{\omega_{pe}} (3\varepsilon_R k_L \sqrt{1+k_L^2} (1+11k_L^2) - 1) - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(1+k_L^2)^{3/2}}{k_L^3} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( 3 + \frac{1}{k_L^2} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_R \equiv E_0 / E_D$ ,  $k_L \equiv k_z d_E \equiv k_z v_{Te} / \omega_{pe}$ ,  $E_0$  — амплитуда внешнего квазистатического электрического поля,  $E_D$  — величина локального дрейсеровского поля [1, 4, 5, 17, 19],  $v_{Te}$  — тепловая электронная скорость,  $d_e$  — дебаевский электронный радиус. В самом начале вспышечного процесса, в «период электронных столкновений» [8]

$$v_{эф} \equiv v_{ei}^* = \frac{1}{6\pi\varepsilon_0} \frac{Ze^4 \ln \Lambda}{T_e^{3/2} \sqrt{2\pi m_e}} n_i, \quad (3)$$

где  $v_{ei}^*$  — частота столкновений электронов и ионов в случае высокочастотных ленгмюровских колебаний;  $Z$  — атомный номер иона (для полностью ионизованной плазмы  $Z = 1$ );  $n_i$  — ионная концентрация в  $\text{см}^{-3}$ ;  $\ln \Lambda$  — кулоновский логарифм;  $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — масса электрона,  $T_e$  — «электронная» температура плазмы;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума в системе СИ. На пределе используемых приближений, в конце фазы, предшествующей фазе «предварительного нагрева»,

$$v_{эф} \equiv \frac{\Omega_e}{m} \varepsilon_R^3. \quad (4)$$

Здесь  $v_{эф}$  — эффективная частота рассеяния (потери импульса) электронов на пульсациях развитой бернштейновской турбулентности [2];  $\Omega_e$  — электронная циклотронная частота;  $m = 10$  для первой бернштейновской гармоники и  $m = 5$  — для второй. Период развития предвспышечного состояния в петле, когда эффективная частота столкновений определяется выражением (4), впредь будем условно называть «периодом бернштейновской турбулентности» [8]. Как

было показано в работах [6, 7], бернштейновская неустойчивость в предвспышечной плазме петель с «уравнениями состояния» MAVN и VAL имеет самый низкий порог возбуждения по амплитуде электрического поля. При этом ленгмюровская неустойчивость имеет самый высокий порог. Поэтому весьма вероятным видится сценарий развития событий, в котором эта неустойчивость будет развиваться на фоне уже развитой бернштейновской турбулентности [8].

Из выражения (2) для относительного инкремента видно, что в бесстолкновительном приближении, равно как и в «период электронных столкновений», скорость роста возмущений не зависит от величины магнитного поля в полном соответствии с классическими воззрениями на процесс развития неустойчивости продольных волн. Вместе с тем из выражения (4) хорошо видно, что в «период бернштейновской турбулентности» величина  $\Gamma$  зависит от напряженности «внешнего» магнитного поля в силу зависимости величины  $v_{эф}$  от циклотронной частоты  $\Omega_c$ . В предыдущих работах [6, 7] нами использовалась модель петли, в которой на исследуемом участке ее токового контура, в интервале высот от 350 до 1400 км над уровнем фотосферы, напряженность магнитного поля изменяется в «килоггауссовом диапазоне» (от 140 до 900 мТл). Такая конфигурация поля в петлях, с наиболее высокими значениями напряженности вблизи их оснований, является самой распространенной [20]. Этой же моделью мы пользовались и при исследовании устойчивости ленгмюровских волн в плазме с уравнением состояния FAL [11]. Отдельно стоит отметить, что авторы модели FAL в [11] особенно обращают внимание на то, что проведенные ими расчеты справедливы для тех областей солнечной атмосферы, где можно пренебречь влиянием крупномасштабных потоков масс и сдвиговых движений плазмы, а локальная диссипация энергии (в переходной области) мала по сравнению с радиационными потерями, которые уравнивают нисходящий поток энергии, привносимый частицами из корональной области. Такие физические условия, по их мнению, реализуются в основаниях горячих корональных петель.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В полуэмпирической модели FAL [11], как и в моделях MAVN [16] и VAL [21], вертикальный масштаб неоднородности температуры и плотности в среднем достаточно «мелкий» по сравнению с толщиной петли. Согласно оценкам, полученным авторами FAL, минимальная толщина должна составлять несколько сотен километров. При этом самый маленький шаг по высоте получается вблизи верхней границы области (там  $\Delta h \leq 1$  км), самый большой — в субфотосферных слоях, вблизи основания петли (там  $\Delta h \approx 50$  км). Поскольку «разметка» по высоте во всех трех вышеупомянутых моделях в основном не совпадает, то для сравнения результатов расчетов в рамках FAL с аналогичными величинами в MAVN и VAL выбирались значения высоты заведомо немного больше и немного меньше заданного уровня. Из четырех разновидностей модели FAL (модификации А, С, F и P) для сравнения с MAVN и VAL были выбраны только две, а именно А и P. В первой из них на одной и той же высоте значения температуры и плотности плазмы получаются наименьшими, а во второй — наибольшими. Расчеты были выполнены для двух случаев: а) для «периода электронных столкновений», когда  $v_{эф}$  определяется выражением (3); б) для «периода бернштейновской турбулентности», когда  $v_{эф}$  определяется по формуле (4). Основные физические характеристики предвспышечной плазмы петель с тремя различными уравнениями состояния — MAVN, VAL и FAL — представлены в табл. 1.

В последней графе табл. 1 приведены значения коэффициента перед  $\epsilon_R^3$  в формуле (4), когда  $v_{эф}$  (4) выражается в единицах  $\omega_{pe}$ . Обычно это делается для того, чтобы легче было сравнивать величины эффективной частоты столкновений в «период электронных столкновений» и в «период бернштейновской турбулентности». Очевидно, что в данном случае речь идет о турбулентности, которая развилась из неустойчивости первой гармоники.

Структура поверхности приведенного инкремента  $\Gamma(2)$  как функции переменных  $\epsilon_R$  и  $k_L$  в

Таблица 1. «Уравнения состояния» плазмы и ее основные характеристики на различных высотах в петле

Модель атмосферы	Модификация	$n_e$ , $10^{11} \text{см}^{-3}$	$T_e = T_p$ , К	$B_0$ , мТл	$h$ , км	$v_{Te}$ , км/с	$\omega_{pe}$ , $10^{10} \text{с}^{-1}$	$\Omega_e$ , $10^{10} \text{с}^{-1}$	$d_e$ , $10^{-4} \text{см}$	$v_{ei}^*$ , $10^7 \text{с}^{-1}$	$\Omega_e / 10 \omega_{pe}$
MAVN F1	F1	3.58	5620	321	675	292	3.37	5.64	8.66	3.29	0.167
FAL F1(1) <sub>p</sub>	Модель P	2.50	5220	321	650	281	2.81	5.64	10.01	2.560	0.201
FAL F1(2) <sub>p</sub>	Модель P	3.02	5480	321	700	288	3.10	5.64	9.29	2.891	0.182
FAL F1(1) <sub>A</sub>	Модель A	0.714	4390	321	650	258	1.51	5.64	17.08	0.949	0.373
FAL F1(2) <sub>A</sub>	Модель A	0.468	4510	321	700	262	1.22	5.64	21.48	0.601	0.451
VAL E	E	1.05	6500	145	1380	314	1.78	2.56	17.6	0.776	0.143
FAL E(1) <sub>p</sub>	Модель P	4.79	7420	145	1380	335	3.80	2.56	8.82	1.226	0.068
FAL E(2) <sub>A</sub>	Модель A	0.31	6150	145	1375	305	0.97	2.56	31.44	0.093	0.260

своих наиболее характерных чертах остается неизменной при переходе от «периода электронных столкновений» к «периоду бернштейновской турбулентности»: предельно малые отрицательные значения инкремента («подкритическое» состояние неустойчивости) при  $0 \leq k_L < 0.2$ , четко выраженный «завал» в районе  $k_L \approx 0.5$  и медленный рост при  $k_L > 2$  с последующим выходом в положительное полупространство. Фактически изменяются только граничные значения  $(k_L)_{\text{гран}}$  и  $(\epsilon_R)_{\text{гран}}$ , при которых декремент затухания становится инкрементом роста неустойчивости. В табл. 2 приведены указанные граничные значения и первые значения приведенного инкремента в положительной области для всех «уравнений состояния» из табл. 1. На рис. 1 показан вид поверхности приведенного инкремента для «уравнения состояния» FAL F1(1) (модель P,  $h = 650$  км).

Как было отмечено ранее [6, 7], при приближении  $k_L$  к значению  $k_L = 2\pi \approx 6.28$  длина волны возмущения сравнивается с электронным дебаевским радиусом, и используемое плазменное приближение [1] становится нелегитимным. При увеличении  $\epsilon_R$  увеличивается процент «убежавших» электронов. Поэтому данные табл. 2 указывают на то, что при переходе от модели атмосферы VAL к модели FAL (т. е. при учете процесса диффузии гелия [11]) затрудняется возникновение и развитие исследуемой неустойчивости, поскольку в этом случае растут (хотя и незначительно) значения  $(\epsilon_R)_{\text{гран}}$ , а также значения  $(k_L)_{\text{гран}}$ , причем последние — весьма заметно. Для модели MAVN F2 учет диффузии мало что изменяет, так как при переходе к FAL  $(\epsilon_R)_{\text{гран}}$

уменьшается при увеличении  $(k_L)_{\text{гран}}$  и наоборот. При этом «огрубленные средние» значения этих величин практически не меняются. То же самое наблюдается и при переходе от MAVN F1 к FAL F1(1)<sub>A</sub> и FAL F1(2)<sub>A</sub>. И только учет диффузии гелия при переходе от MAVN F1 к FAL F1(1)<sub>p</sub> и FAL F1(2)<sub>p</sub> несколько облегчает процесс возникновения и развития неустойчивости, поскольку в этом случае незначительное увеличение значений  $(k_L)_{\text{гран}}$  сопровождается отчетливо выраженным снижением порога по амплитуде электрического поля.

Еще более отчетливо негативная (по отношению к возбуждению неустойчивости) тенденция, обнаружившая себя в «период электронных столкновений», проявляется в «период бернштейновской турбулентности», когда снижение порога возбуждения по электрическому полю неизменно сопровождается уменьшением величины граничной длины волны возмущения. И наоборот, при уменьшении  $(k_L)_{\text{гран}}$  до предела

Таблица 2. Граничные значения основных характеристик высокочастотной ленгмюровской неустойчивости в «период электронных столкновений»

Модель атмосферы	Модификация	$(\epsilon_R)_{\text{гран}}$	$(k_L)_{\text{гран}}$	$\Gamma_{(1+)}$	$h$ , км
MAVN F1	F1	0.097	3.11	$8.67 \cdot 10^{-5}$	675
FAL F1(1) <sub>p</sub>	P	0.091	3.21	$1.76 \cdot 10^{-5}$	650
FAL F1(2) <sub>p</sub>	P	0.089	3.21	$2.89 \cdot 10^{-5}$	700
FAL F1(1) <sub>A</sub>	A	0.092	3.51	$4.75 \cdot 10^{-5}$	650
FAL F1(2) <sub>A</sub>	A	0.094	3.71	$1.02 \cdot 10^{-4}$	700
VAL E	E	0.095	3.81	$4.74 \cdot 10^{-5}$	1380
FAL E(1) <sub>p</sub>	P	0.095	4.11	$1.32 \cdot 10^{-4}$	1380
FAL E(2) <sub>A</sub>	A	0.097	5.51	$3.32 \cdot 10^{-5}$	1375

величина  $(\epsilon_R)_{\text{гран}}$  существенно возрастает. Так, при численном моделировании для минимальных значений  $(k_L)_{\text{гран}} = 1.91$  и  $(k_L)_{\text{гран}} = 2.26$  были получены одинаковые значения  $(\epsilon_R)_{\text{гран}} = 0.193$ . Совершенно очевидно, что субдрейсеровское поле такой амплитуды создает недопустимо высокую долю «убежавших» электронов [8] с точки зрения используемой концепции исследований. Поскольку степень правомерности используемого плазменного приближения [1, 2] для неустойчивостей с  $(k_L)_{\text{гран}} = 2.26$  и  $(k_L)_{\text{гран}} = 6.28$  реально является одинаковой, то было решено в расчетах основное внимание сосредоточить на неустойчивостях с минимальным порогом возбуждения по электрическому полю, хотя для них для всех граничная длина волны возмущения практически совпадает с электронным дебаевским радиусом. Вычисления были

Таблица 3. Граничные значения основных характеристик высокочастотной ленгмюровской неустойчивости в «период бернштейновской турбулентности» (случай первой гармоники)

Модель атмосферы	Модификация	$(\epsilon_R)_{\text{гран}}$	$(k_L)_{\text{гран}}$	$\Gamma_{(1+)}$	$h$ , км
MAVN F1	F1	0.077	6.21	$4.07 \cdot 10^{-4}$	675
FAL F1(1) <sub>п</sub>	Р	0.073	6.26	$3.89 \cdot 10^{-4}$	650
FAL F1(2) <sub>п</sub>	Р	0.075	6.26	$4.48 \cdot 10^{-4}$	700
FAL F1(1) <sub>А</sub>	А	0.063	6.21	$2.53 \cdot 10^{-4}$	50
FAL F1(2) <sub>А</sub>	А	0.060	6.21	$4.54 \cdot 10^{-4}$	700
VAL E	E	0.079	6.27	$1.12 \cdot 10^{-4}$	1380
FAL E(1) <sub>п</sub>	Р	0.096	6.21	$6.28 \cdot 10^{-5}$	1380
FAL E(2) <sub>А</sub>	А	0.068	6.27	$7.09 \cdot 10^{-5}$	1375

Таблица 4. Граничные значения основных характеристик высокочастотной ленгмюровской неустойчивости в «период бернштейновской турбулентности» (случай второй гармоники)

Модель атмосферы	Модификация	$(\epsilon_R)_{\text{гран}}$	$(k_L)_{\text{гран}}$	$\Gamma_{(1+)}$	$h$ , км
MAVN F1	F1	0.064	6.26	$1.03 \cdot 10^{-4}$	675
FAL F1(1) <sub>п</sub>	Р	0.062	6.21	$5.51 \cdot 10^{-4}$	650
FAL F1(2) <sub>п</sub>	Р	0.063	6.26	$3.56 \cdot 10^{-4}$	700
FAL F1(1) <sub>А</sub>	А	0.053	6.21	$2.9 \cdot 10^{-4}$	650
FAL F1(2) <sub>А</sub>	А	0.050	6.26	$1.81 \cdot 10^{-4}$	700
VAL E	E	0.067	6.22	$1.52 \cdot 10^{-4}$	1380
FAL E(1) <sub>п</sub>	E	0.081	6.21	$3.49 \cdot 10^{-4}$	1380
FAL E(2) <sub>А</sub>	Р	0.058	6.18	$4.37 \cdot 10^{-5}$	1375

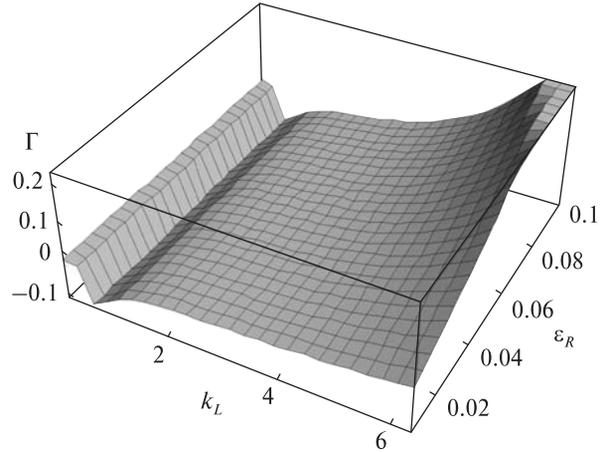


Рис. 1. Приведенный инкремент  $\Gamma$  как функция приведенного волнового числа  $k_L \equiv k_z d_e$  и амплитуды электрического поля  $\epsilon_R = E_0/E_D$  в «период электронных столкновений».

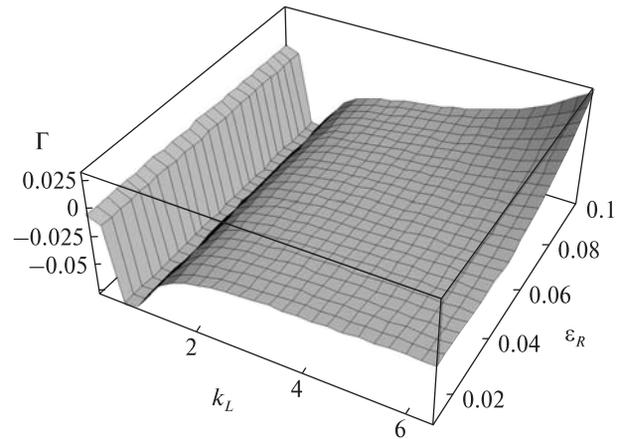


Рис. 2. Приведенный инкремент высокочастотной ленгмюровской неустойчивости в «период бернштейновской турбулентности» для «уравнения состояния» из FAL F1(2) с  $(\epsilon_R)_{\text{гран}} = 0.050$  и  $(k_L)_{\text{гран}} = 6.26$ .

проведены отдельно для случаев, когда бернштейновская турбулентность возникает из неустойчивости первой и второй бернштейновских гармоник. Результаты расчетов приведены в табл. 3 и 4. Общий вид поверхности приведенного инкремента не изменяется при замене  $v_{\text{эф}}$  из формулы (3) на  $v_{\text{эф}}$  из формулы (4). Вид функции  $\Gamma = \Gamma(k_L, \epsilon_R)$  для модели атмосферы FAL F1(2) ( $h=700$  км, модель А, вторая гармоника) приведен на рис. 2.

Данные, приведенные в табл. 3, позволяют определить общую тенденцию: при переходе от MAVN и VAL к FAL величины  $(k_L)_{\text{гран}}$  изменяются весьма незначительно: относительное изменение в основном не превышает 1 %. В то же время величины  $(\epsilon_R)_{\text{гран}}$  изменяются весьма заметно, особенно в моделях А из FAL, где их относительное изменение может достигать 15—17 %. Именно в этих случаях учет процесса диффузии гелия формально облегчает возникновение и развитие ленгмюровской неустойчивости.

При переходе к исследованию устойчивости ленгмюровских волн на фоне бернштейновской турбулентности, возникшей из неустойчивости второй гармоники, общая картина остается неизменной в том смысле, что переход от MAVN и VAL к модели FAL, учитывающей диффузию гелия, облегчает процесс развития неустойчивости только для некоторых моделей А. При этом по сравнению со «случаем первой гармоники» относительное изменение граничной длины волны возмущения становится еще меньше, а порог возбуждения по величине электрического поля — еще ниже, тогда как его относительное изменение увеличивается (в максимуме оно достигает 21.8 %).

Как видно из табл. 2—4, во всех рассмотренных случаях величина  $\Gamma_{(1+)}$ , представляющая собой первое ненулевое значение приведенного инкремента при выходе поверхности  $\Gamma = \Gamma(k_L, \epsilon_R)$  в «положительное» полупространство, остается чрезвычайно малой. Это свидетельствует о высокой добротности исследуемого процесса.

## ВЫВОДЫ

Итоги проведенного исследования можно сформулировать следующим образом: учет процесса диффузии гелия для некоторых уравнений состояния предвспышечной плазмы облегчает процесс возникновения и развития высокочастотной неустойчивости, поскольку снижает порог ее возбуждения по амплитуде электрического поля. При этом значение граничной длины волны возбуждения во всех случаях остается величиной порядка электронного дебаевского радиуса. В этом смысле, даже учитывая высокую

добротность исследуемого волнового процесса, данная неустойчивость является маргинальной, поскольку возникает на пределе применимости приближений, используемых в расчетах [6, 8]. С точки зрения величины порога неустойчивости по амплитуде квазистатического субдрейсеровского [17] электрического поля развитие неустойчивости на фоне бернштейновской турбулентности является более предпочтительным, чем в более ранний «период электронных столкновений».

1. Алтынцев А. Т., Банин В. Г., Кузлин Г. В., Томозов В. М. Солнечные вспышки. — М.: Наука, 1982. — 247 с.
2. Галеев А. А., Сагдеев Р. З. Нелинейная теория плазмы // Вопросы теории плазмы. — 1973. — Вып. 7. — С. 3—145.
3. Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. — М.: Мир, 1978. — 492 с.
4. Де Ягер К. Строение и динамика атмосферы Солнца. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962. — 376 с.
5. Зайцев В. В., Степанов А. П., Цап Ю. Т. Некоторые проблемы физики солнечных и звездных вспышек // Кинематика и физика небес. тел. — 1994. — 10, № 6. — С. 3—31.
6. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. Неустойчивости высокочастотных ленгмюровских волн в предвспышечной плазме // Космічна наука і технологія. — 2005. — 11, № 1/2. — С. 68—74.
7. Кришталь А. Н., Герасименко С. В. О последовательности появления неустойчивостей плазменных волн в основаниях арочных структур на Солнце на ранних этапах вспышечного процесса // Кинематика и физика небес. тел. — 2005. — 21, № 5. — С. 352—367.
8. Кришталь О. Н. Дрібномасштабні нестійкості в передспалаховій плазмі петель в активній області Сонця: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук / НАН України. Головна астрономічна обсерваторія. — Київ, 2008. — 40 с.
9. Максимов В. П., Томозов В. М. О возможных проявлениях турбулентного Штарк-эффекта в различных моделях вспышки // Год солнечного максимума: Тр. Междунар. конф., Симферополь, 27—31 марта 1981 г. — М.: Изд-во ИЗМИРАН, 1981. — Т. 1. — С. 168—177.
10. Сомов Б. В. Солнечные вспышки // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия. — 1987. — 34. — С. 78—135.
11. Fontenla J. M., Avrett E. H., Loeser R. Energy balance in solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion // Astrophys. J. — 1993. — 406, N 1. — P. 319—345.

12. Foukal P., Hinata S. Electric fields in the solar atmosphere: a review // *Solar Phys.* — 1991. — **132**, N 1. — P. 307–330.
13. Harra I. K., Mathews S. A., Culhane J. L. Nonthermal velocity evolution in the precursor phase of a solar flare // *Astrophys. J.* — 2001. — **549**, N 2. — P. L245–L248.
14. Heyvaerts J., Priest E., Rust D. An emerging flux model for the solar flare phenomenon // *Astrophys. J.* — 1977. — **216**, N 1. — P. 213–221.
15. Kryshchal A. N., Kucherenko V. P. A possible excitation mechanism for a longitudinal wave instability in a plasma by a quasi-static electric field // *J. Plasma Phys.* — 1995. — **53**, part 2. — P. 169–184.
16. Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.* — 1980. — **242**, N 1. — P. 336–351.
17. Miller I. A., Cargil P. I., Emslie A. G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102A**, N 7. — P. 14631–14659.
18. Pines D., Schrieffer J. R. Collective behavior in solid-state plasmas // *Phys. Rev.* — 1961. — **124**, N 5. — P. 1387–1400.
19. Poletto G., Kopp R. A. Macroscopic electric fields during two-ribbon flares // *The lower atmosphere of solar flares* / Ed. by D. Niedeg. — Sacramento Peak, NM, 1986. — N 50. — P. 453–465.
20. Solanki S. K. Small-scale solar magnetic fields: an overview // *Space Sci. Revs.* — 1993. — **63**. — P. 1–183.
21. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of solar chromosphere. III. Models EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1981. — **45**. — P. 635–725.

Надійшла до редакції 10.08.09

A. N. Kryshchal', S. V. Gerasimenko,  
A. D. Voitsehovskaya, A. A. Soloviov

#### ON THE POSSIBILITY OF LANGMUIR TURBULENCE DEVELOPMENT AT THE EARLY STAGE OF A FLARE PROCESS

We investigated some conditions of the appearance of high-frequency electron langmuir wave instability in a plasma near the foot-point of the loop structure at the early stage of a flare process in a solar active region (AR). The process of the instability rise and development is a result of the combined action of the following factors: the existence of a weak large-scale electric field in the loop current circuit, influence of the pair Coulomb collisions, loss of electron momentum due to the interaction with the pulsations of saturated Bernstein turbulence and Landau damping. It is assumed that near the loop footpoint, in the region of «kilogauss» magnetic fields, the plasma density and temperature are determined in the framework of the semiempirical model FAL (Fontenla-Avrett-Loeser) for solar atmosphere which takes into account the helium diffusion process. We performed the comparison of the obtained results with the analogous results derived in the framework of alternative models MAVN (Machado-Avrett-Vernazza-Noyes) and VAL (Vernazza-Avrett-Loeser) for the solar atmosphere.

УДК 520.2+520.874.7

**В. П. Кузьков<sup>1</sup>, Д. В. Воловик<sup>1</sup>, С. В. Кузьков<sup>1</sup>, З. Содник<sup>2</sup>, С. П. Пуха<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Європейське космічне агентство, ESTEC, Ноордвік (Нідерланди)

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## **СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ГЕОСТАЦИОНАРНЫМ СПУТНИКОМ**

*Розроблено, виготовлено і випробувано систему наведення і супроводження телескопа для лазерних комунікаційних експериментів з нестабільним геостационарним супутником ARTEMIS ESA (відхилення супутника від середнього положення 7.2°) з використанням касегренівського фокуса 70-см телескопа. Система дозволяє виявляти нестабільні геостационарні супутники, комети і астероїди до 18<sup>m</sup>, а також здійснювати їхній супровід з середнім квадратичним відхиленням 0.68 сд (секунд дуги) по часовому куту і 0.34 сд по схиленню*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для низкоорбитальных космических аппаратов, особенно спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) актуальна проблема непрерывной передачи большого объема информации на наземные пункты. Один из путей решения этой задачи — увеличение скорости передачи прямо на наземный пункт приема. Этот путь имеет ограничения по скорости передачи радиочастотным диапазоном на наземную станцию и требует большого количества наземных приемных станций (ретрансляторов). Второй путь — непрерывная передача информации через космические системы связи, в частности через геостационарные спутники. Этим путем пошло ESA, разработав и запустив в 2001 г. геостационарный спутник ARTEMIS (Advance Relay And Technology Mission). ARTEMIS имеет приемно-передающую систему Ка-диапазона (23.12–27.50 ГГц, 3×150 Мбит/с) для приема информации с низкоорбитальных спутников (она регулярно используется для приема информации с ДЗЗ-спутника «Envisat» (ESA), стандартную приемно-передающую систему Ку-диапазона (10.7–12.75 ГГц), передающую систему S-диапазона (2.025–2.290 ГГц), систему связи

L-диапазона (1.525–1.559 ГГц) для поддержания связи с наземными мобильными терминалами, а также лазерный терминал связи SILEX (810–850 нм) для получения ДЗЗ-информации с низкоорбитальных спутников (SPOT-4, OISET) и ретрансляции информации на наземные пункты в Ку-диапазоне.

Низкоорбитальные спутники оборудованы соответствующими терминалами связи радиоили оптического диапазона. ARTEMIS также работает в навигационной системе определения координат EGNOS.

После приоритетных экспериментов (ноябрь 2001 г.) [9, 10] по передаче информации через лазерные терминалы со спутника SPOT-4 на ARTEMIS такие сеансы передачи со спутника SPOT-4 проводятся на регулярной основе. С 2003 г. проводятся лазерные коммуникационные эксперименты между спутником ARTEMIS и наземной оптической станцией OGS ESA для исследования влияния атмосферы на распространение лазерного коммуникационного излучения [4, 8]. Для ESA представляет интерес изучения влияния атмосферы на лазерное излучение в разных регионах земного шара.

В ГАО НАН Украины проводятся исследования и разработка аппаратуры [1–3, 5–7] для лазерных коммуникационных экспериментов со спутником ARTEMIS с использованием касег-

© В. П. КУЗЬКОВ, Д. В. ВОЛОВИК, С. В. КУЗЬКОВ,  
З. СОДНИК, С. П. ПУХА, 2009

реновского фокуса стандартного астрономического телескопа АЗТ-2. Разработан проект лазерных атмосферных и коммуникационных экспериментов с низкоорбитального спутника на наземные оптические станции. Во время этих работ разработана и испытана система наведения и сопровождения нестабильных геостационарных спутников, в частности спутника ARTEMIS, описание которой изложено ниже.

### ОСОБЕННОСТИ ОРБИТЫ СПУТНИКА ARTEMIS

С помощью бортовых двигателей коррекции спутник удерживается по азимуту в районе точки  $21.5^\circ$  E, но наклон орбиты спутника к плоскости земного экватора (следствие неполадок при запуске) постоянно возрастает и в данное время составляет более  $7^\circ$ . График расчета суточного движения спутника на дату 8 апреля 2009 г. показан на рис. 1.

Как видно, траектория движения спутника напоминает вытянутую «восьмерку», вектор скорости спутника периодически изменяется по часовому углу и прямому восхождению. Как следствие, гидировочное движение телескопа при ведении спутника всегда происходит с переменными скоростью и ускорением. Так как телескоп обладает значительной массой, то усилия, прикладываемые к приводам движения телескопа, постоянно изменяются, и имеют значительную величину. Кроме того, большая масса приводит к возникновению больших моментов инерции. В силу этого механические системы привода вращения телескопа по часовому углу и склонению должны обеспечивать переменный момент движения в широком динамическом диапазоне.

Все вышеуказанные условия приводят к возникновению дополнительных требований к системе сопровождения нестабильных геостационарных спутников.

### МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

Согласно расчетным параметрам орбиты (рис. 1) движение телескопа при сопровождении неста-

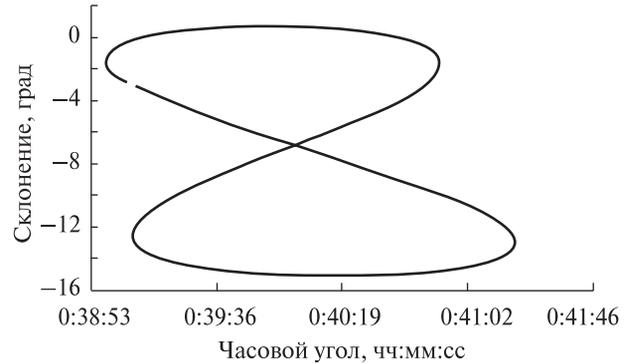


Рис. 1. График суточного движения спутника

бильных геостационарных спутников производится с переменной скоростью на протяжении всей его орбиты.

Так как телескоп обладает экваториальной монтировкой, то его движение производится путем вращения вокруг оси склонения  $\delta$  и часового угла  $h$ . Если угловые скорости и ускорения вращения телескопа вокруг осей обозначить  $\omega_\delta$ ,  $\omega_h$ ,  $\epsilon_\delta$  и  $\epsilon_h$ , то линейные ускорения в каждой точке телескопа будут равны

$$\mathbf{a}_\delta = \frac{[\omega_\delta \mathbf{r}_\delta]}{dt} = [\epsilon_\delta \mathbf{r}_\delta] + [\omega_\delta [\omega_\delta \mathbf{r}_\delta]], \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_h = \frac{[\omega_h \mathbf{r}_h]}{dt} = [\epsilon_h \mathbf{r}_h] + [\omega_h [\omega_h \mathbf{r}_h]].$$

В силу жесткой конструкции монтировки телескопа вторыми слагаемыми (осеостремительными ускорениями) в выражениях (1) можно пренебречь. Вследствие нестационарности орбиты спутников величины  $\mathbf{a}_\delta$  и  $\mathbf{a}_h$  переменны, в основном отличны от нуля и периодически изменяют знак. Из расчетных параметров орбиты можно получить, что скорость движения по координатам изменяется в диапазоне  $0-2.1$  сд/с. (Здесь и далее для секунд дуги употребляются буквенные обозначения:  $1'' = 1$  сд =  $10^3$  мсд =  $10^6$  мксд).

Моменты сил, прикладываемые к осям телескопа, и моменты инерции телескопа могут быть рассчитаны по формулам

$$\mathbf{M}_\delta = m_\delta [\mathbf{r}_\delta \mathbf{a}_\delta], \quad \mathbf{M}_h = m_h [\mathbf{r}_h \mathbf{a}_h], \quad (2)$$

$$J_\delta = (r_{0\delta})^2 m_\delta, \quad J_h = (r_{0h})^2 m_h, \quad (3)$$

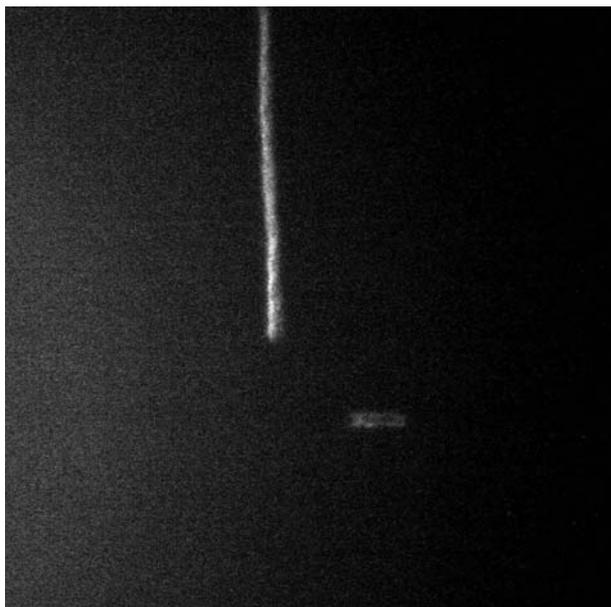


Рис. 2. Трек спутника ARTEMIS и трек звезды

где  $r_{0\delta}$  и  $r_{0h}$  — радиусы инерции относительно осей  $\delta$  и  $h$ . Считая, что для телескопа АЗТ-2 основные массы сосредоточены в узлах первичного и вторичного зеркала, а масса трубы равномерно распределена по всей длине, и учитывая массу противовеса телескопа, получим их значения  $r_{0\delta} \approx 1$  м,  $m_{\delta} \approx 1.1$  т,  $r_{0h} \approx 1.5$  м,  $m_h \approx 2.2$  т, а также значения моментов инерции телескопа  $J_{\delta} = 1100$  м<sup>2</sup>кг и  $J_h = 4950$  м<sup>2</sup>кг.

Для точного сопровождения нестабильного геостационарного спутника моменты сил двигателей коррекции должны значительно превосходить величины, определяемые выражениями (2). При сопровождении спутника также должны учитываться моменты инерции телескопа по его осям (3). В идеальном случае необходимо вводить дополнительные поправочные коэффициенты в разных участках орбиты спутника.

## СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ НА НЕСТАБИЛЬНЫЕ ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ СПУТНИКИ

Для наведения на спутники используются две цифровые камеры, расположенные в касегреновском фокусе телескопа АЗТ-2 ( $D = 70$  см,  $F = 10.5$  м). Особенностью наведения телескопа на нестабильные геостационарные спутники

является то, что изображение спутников размывается на ряд пикселей камеры наведения, вследствие чего реальная яркость изображения значительно уменьшается.

Первая цифровая камера с CMOS-чувствительным элементом (2000×3000 пкл) работает через фокальный редуктор, укорачивающий фокус телескопа до 5 м. Размер поля зрения (10.6′×16′). Диапазон экспозиции от 0.001 до 30 с. Возможны более длительные экспозиции. Так как точность наведения телескопа по координатам шкал составляет 2′, этой камерой осуществляется первоначальный поиск движущегося спутника.

После обнаружения спутника включается система коррекции движения телескопа. После вывода на центр CMOS-камеры изображение перехватывается второй цифровой камерой с чувствительным CCD-элементом (596×795 пкл). Она имеет термоэлектрическое охлаждение чувствительного элемента, диапазон экспозиции от 0.001 с до нескольких часов и поле зрения в Кассегреновском фокусе телескопа 1.6′×2.3′. Обе камеры управляются в дистанционном режиме с компьютера через USB-интерфейсы.

Испытание первой камеры системы наведения проводилось по различным астрономическим объектам (спутники Сатурна, слабые звезды). Результаты испытаний показали, что проникающая способность CMOS камеры составляет около 18<sup>m</sup> при экспозиции 30 с и отношении сигнал/шум, равном единице. При этом проникающая способность ограничивается не шумами камеры, а фоном неба.

На рис. 2 показан фрагмент снимка CMOS-камеры, где отображен трек спутника ARTEMIS и трек звезды.

## СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

Наземные и космические лазерные терминалы связи используют сверхузкие коммуникационные лучи с диаграммой направленности 1–2 сд. В связи с этим возникают жесткие требования к системе ведения спутников, погрешность которой должна быть меньше 1 сд.

Система движения телескопа для сопровождения нестабильных геостационарных спутников основана на двух дополнительных шаговых двигателях: по часовой оси ( $h$ ) и по оси прямого восхождения ( $\delta$ ), работающих через соответствующие механические редукторы. Схема работы и управления шаговыми двигателями показана на рис. 3.

К штатным аналоговым двигателям системы коррекции телескопа добавлены шаговые двигатели цифровой коррекции телескопа по координатам  $h$  и  $\delta$ . Цифровые шаговые двигатели работают в микрошаговом режиме. В цифровом блоке коррекции с помощью микропроцессора формируются управляющие сигналы на обмотки шаговых двигателей. Компьютерный шаг коррекции скорости составляет 0.3 мс/с при диапазоне скоростей коррекции от 0 до 4 сд/с. Блок коррекции расположен возле телескопа. Скорости коррекции могут задаваться как непосредственно на блоке, так и в удаленном режиме с помощью вспомогательных программ на компьютерах через интерфейс RS-485.

При гидировании спутника его положение отслеживается второй цифровой камерой с CCD-элементом, основные параметры которой приведены в таблице.

Программное обеспечение CCD-камеры позволяет дистанционно задавать экспозиции в диапазоне от 0.001 с до нескольких часов, просматривать и записывать изображения, а также проводить объединение пикселей в режимах  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$ .

## ПРОГРАММНОЕ ВЕДЕНИЕ

Расчеты орбиты нестабильного геостационарного спутника выполняются по двухстрочным данным (TLE) орбиты спутника, взятым из базы данных NORAD, а также по геоцентрическим данным орбиты спутника, получаемым с сервера ESA.

Формальная расчетная точность положения спутника составляет 1 сд. Реальная точность сопровождения спутника определяется механикой телескопа и выбранной расчетной моделью орбиты спутника.

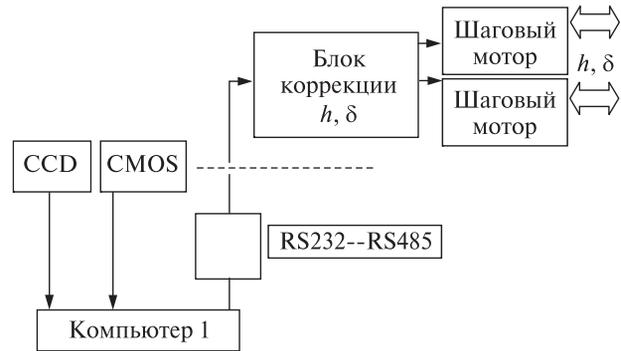


Рис. 3. Схема работы и управления шаговыми двигателями

### Параметры CCD-камеры

Тип сенсора	Sony ExView ICX 429 AL
Разрешающая способность	752 × 582 пкл
Размер пикселя	8.6 × 8.3 мкм
АЦП	16 бит
Шум считывания	8 e-
Шум чувствительного элемента	0.02 e-/пкл/с
Минимальная экспозиция	1 мс
Охлаждение	Термоэлектрическое до -30° относительно окружения

При расчете орбиты для конкретного временного отрезка минимальный интервал (шаг) расчета обычно берется равным 1 минуте. Для данного интервала рассчитываются: часовой угол  $h$ , склонение  $\delta$ , а также скорости движения объекта по координатам  $h$  и  $\delta$  в заданном промежутке времени.

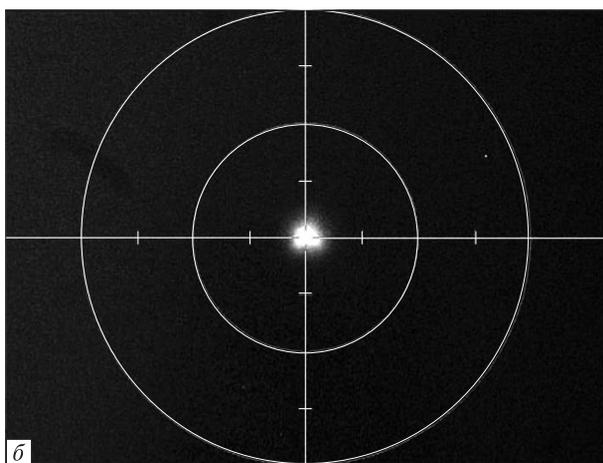
Данные, содержащие скорость движения, вводятся в виде текстового файла в программу управления шаговыми двигателями. Программа проводит аппроксимацию орбиты спутника в 1-мин интервале. Программа дает возможность корректировать скорости и вносить поправки (вплоть до изменения знака (направления) скорости движения спутника). Осуществляя поступательную коррекцию скорости вращения шаговых двигателей, мы добиваемся высокой точности ведения нестабильного геостационарного спутника. Общий вид блока коррекции приведен на рис. 4.



Рис. 4. Блок коррекции движения телескопа AZT-2



а



б

Рис. 5. Изображение гидрируемого спутника ARTEMIS на экране CCD-камеры: а — при экспозиции 1 с (рядом — трек звезды), б — при экспозиции 5 с

## ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

Испытание системы сопровождения проводилось по спутнику ARTEMIS. Были использованы различные режимы работы CCD-камеры. Диапазон экспозиций составлял 0.05–5 с, бинирование пикселей  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ . Для определения ошибок ведения рассчитывались геометрические центры изображений спутника ARTEMIS, полученные CCD-камерой с различными экспозициями. На рис. 5, а показано изображение спутника ARTEMIS и трека звезды в CCD-камере при экспозиции 1 с. На рис. 5, б показан пример гидрирования спутника при экспозиции 5 с.

Ранее мы исследовали турбулентность атмосферы [1, 5] при коротких (40 мс) экспозициях CCD-камеры. Обработка рядов изображений спутника с экспозициями 1–5 с показала, что даже при экспозициях 5 с наблюдаются турбулентные смещения центров изображения спутника до 2–3 сд.

Для расчета ошибок ведения использовались геометрические центры изображений спутника ARTEMIS, полученные CCD-камерой с экспозицией 5 с в режиме объединения пикселей  $2 \times 2$ . Рассчитывалось среднее положение и среднее квадратичное отклонение положения спутника  $\sigma$ . Например, по 45 изображениям спутника ARTEMIS, полученным 2 апреля 2009 г. на про-

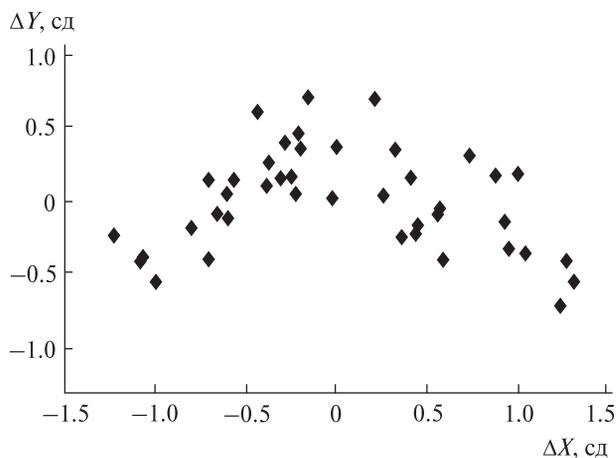


Рис. 6. Распределение ошибок сопровождения спутника

тяжении 5.2 мин, получено: среднее квадратичное отклонение  $\sigma_h = 0.68$  сд, по  $\delta = 0.34$  сд. На рис. 6 показан двухмерный график распределения этих ошибок сопровождения спутника.

Большие ошибки ведения по часовому углу объясняются большей инерционной массой телескопа и большим моментом инерции телескопа при вращении вокруг часовой оси. Для их уменьшения требуется более тщательная балансировка телескопа, и при более тщательном подборе скоростей коррекции ошибки ведения по часовому углу приближаются к ошибкам ведения по оси склонения в некоторых участках сопровождения спутника.

## ВЫВОДЫ

Разработана, изготовлена и испытана система наведения и сопровождения телескопа для лазерных коммуникационных экспериментов с нестабильным геостационарным спутником ARTEMIS ESA с использованием кассегреневского фокуса 70-см телескопа. Она позволяет обнаруживать нестабильные геостационарные спутники, кометы и астероиды до  $18^m$ , а также осуществлять их сопровождение со средним квадратичным отклонением 0.68 сд по часовому углу и 0.34 сд по оси склонения.

Разработанные системы достаточны для проведения лазерных коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником ARTEMIS. Дальнейшее улучшение точности ведения возможно с реализацией систем компенсации турбулентных движений атмосферы.

Работы по созданию системы наведения и сопровождения нестабильных геостационарных спутников выполнялись согласно контракту ESA ESTEC № 19861 и финансовой поддержке Национального космического агентства Украины.

- Кузьков В., Андрук В., Содник З. и др. Сравнительные исследования корреляции атмосферной турбулентности для лазерных коммуникационных экспериментов со спутником ARTEMIS // Кинематика и физика небес. тел. — 2008. — **24**, № 1. — С. 77–85.
- Кузьков В. П., Медведский М. М., Яцкив Д. Я. и др. Подготовка к экспериментам по оптической связи с геостационарным спутником ARTEMIS // Космічна наука і технологія. — 2003. — **9**, № 4. — С. 79–83.
- Кузьков В. П., Недашковский В. Н., Савенков С. Н., Кузьков С. В. Исследование поляризации лазерного передающего модуля для коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником ARTEMIS ESA // Космічна наука і технологія. — 2006. — **12**, № 1. — С. 23–28.
- Alonso A., Reyes M., Sodnik Z., et al. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station // Proc. SPIE. — 2004. — N 5572. — P. 372.
- Kuz'kov V., Andruk V., Sodnik Z., et al. Investigation of Atmospheric Instability for Communication Experiments with ESA's Geostationary Satellite ARTEMIS // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. — 2005. — N 5. — P. 561–565.
- Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N. A Receiver with an Avalanche Photodiode for the Optical Communication Channel from a Geostationary Satellite // Instruments and Experimental Techniques. — 2004. — **47**, N 4. — P. 513–515.
- Kuz'kov V., Sodnik Z., Kuz'kov S., et al. Laser communication experiments with a geostationary satellite from a ground telescope // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 2. — С. 51–55.
- Reyes M., Alonso A., Sodnik Z., et al. Ground to space optical communication characterization // Proc. SPIE. — 2005. — N 5892. — P. 1–16.
- Reyes M., Sodnik Z., Lopez P., et al. Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station // Proc. SPIE. — 2002. — N 4635. — P. 38–49.
- Tolker-Nielsen T., Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical inter satellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX // Proc. SPIE. — 2002. — N 4635. — P. 1–15.

Надійшла до редакції 08.07.09

V. P. Kuz'kov, D. V. Volovyk,  
S. V. Kuz'kov, Z. Sodnik, S. P. Pukha

## POINTING AND TRACKING SYSTEMS OF THE TELESCOPE FOR LASER COMMUNICATION EXPERIMENTS WITH A GEOSTATIONARY SATELLITE

Using the Cassegrain focus of the 0.7 m telescope, the pointing and tracking systems of the telescope were developed and tested for laser communication experiments with the unstable geostationary satellite ARTEMIS ESA (fluctuation of the position is more than  $\pm 7.2^\circ$ ). The systems allow one to find unstable geostationary satellites, comets and asteroids up to  $18^m$  and to perform the tracking of the ARTEMIS satellite with the root mean square deviation 0.68 arcsec by hour angle and 0.34 arcsec by declination.

УДК 621.396.1

**Ф. М. Андреев<sup>1</sup>, С. В. Ковбасюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

<sup>2</sup> Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова Національного авіаційного університету

## **ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННОГО КОМПЛЕКСА, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ РЛС НАДГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

---

*Розглядаються питання комплексного використання національних радіолокаційних засобів надгоризонтного виявлення балістичних та космічних об'єктів. Основну увагу приділено ефективному використанню наявних засобів та перспектив розвитку цього напрямку космічної галузі в Україні.*

---

### **НАЦИОНАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Являясь космической державой, Украина принимает активное участие в различных космических программах, выводя с помощью своих ракет-носителей на околоземные орбиты национальные и иностранные космические аппараты (КА). Второй Государственной космической программой Украины (1998–2002 гг.) было предусмотрено создание национальной Системы контроля и анализа космической обстановки (СКАКО) [7]. Это дало возможность с помощью национальных и внешних источников информации (Главного каталога СККП РФ, каталога Norad) самостоятельно оценивать обстановку в космосе.

До недавнего времени только РФ, США и Китай владели системами контроля космического пространства. В последние годы, после ввода в эксплуатацию в ноябре в 2005 г. радиолокатора GRAVES [8], в число государств, имеющих средства контроля космического пространства (ККП), вошла Франция. За 16 месяцев наблюдений французский радар обнаружил на низких околоземных орбитах больше 2200 объектов, в том числе от 20 до 30 спутников, не

включенных в каталог, обнародованный министерством обороны США.

Европейское космическое агентство также планирует полностью развернуть систему ККП до 2015 года, для чего будет использовать один радиолокатор и 4–5 наземных оптических станций.

Мероприятиями Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2008–2012 гг. в рамках выполнения задания «Обеспечения развития наземной инфраструктуры» предусмотрена модернизация СКАКО [3]. По своей сути это большая сложная информационно-измерительная система, предназначенная для непрерывной оценки космической обстановки в мирное и военное время и обеспечения потребителей информацией необходимого качества. Система включает информационные средства наблюдения (радиолокационные, оптические и др.) и пункты сбора и обработки информации о КА (рис. 1).

Результатом работы информационных средств системы должен быть каталог космических объектов (КО), ведение которого обусловлено необходимостью:

- высокоточного баллистико-навигационного обеспечения планирования применения отечественных КА с высокой разрешающей способностью (в перспективе — группировок КА) (на рис. 2 проиллюстрирована актуальность по-



Рис. 1. Структура системы контроля и анализа космической обстановки

вышения точности определения параметров КА, которые имеют высокую разрешающую способность бортовой аппаратуры);

- обнаружения и сопровождения элементов запуска в случае нештатной ситуации при выведении отечественных КА;
- реализации Украиной ряда международных программ и контроля выполнения странами международных соглашений;
- оценки космического потенциала иностранных государств и космической обстановки в целом как одного из разведывательных признаков;
- оперативного выявления разведывательных КА, которые выводятся на орбиты, что позволит своевременно реализовать комплекс средств по предотвращению утечки информации;
- контроля наличия в околоземном космическом пространстве большого количества малоразмерных объектов, которые представляют угрозу полету рабочих аппаратов, и вышедших из строя крупногабаритных КА, представляющих угрозу целостности экологически опасных объектов (АЭС, ТЭС, химические производства и т. п.).

Требования, которые предъявляются к точностным параметрам каталога КО, с каждым годом повышаются, а к оценкам начальных условий (НУ) движения КА при решении заданий оборонного характера — особенно.

Каждый вид информационных средств, дислоцированных на территории Украины, предна-

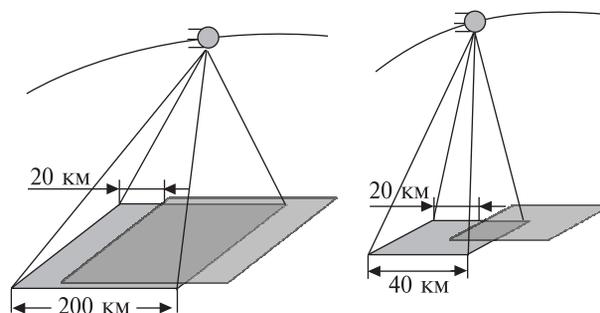


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая актуальность повышения точности определения параметров КА, которые имеют высокую разрешающую способность бортовой аппаратуры

Таблица 1. Характеристики разных видов информационных средств, дислоцированных на территории Украины

Средство	Точность	Оперативность	Особенности
Радиолокационная станция	Низкая	Высокая	Постоянно осуществляет разведку космического пространства
Квантово-оптическая система	Высокая	Высокая	Работает по предварительным целеуказаниям
Командно-измерительная система	Высокая	Низкая	—

значен для решения узкоспециализированных задач и не может автономно и непосредственно быть использован для ведения (обновления) каталога КО (табл. 1).

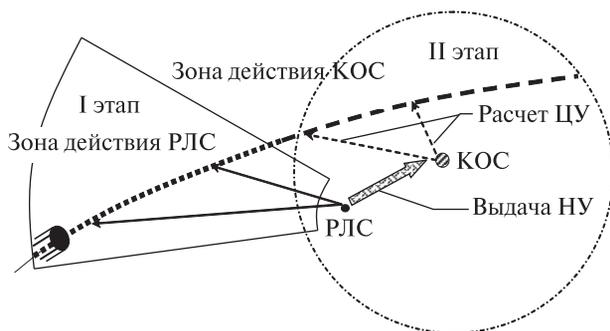


Рис. 3. Схема двухэтапного определения параметров орбит КО

Украина располагает группировкой высокопотенциальных радиолокационных станций надгоризонтного обнаружения (РЛС НГО) баллистических и космических объектов типа 5Н86-М («Днепр-М»), которая состоит из двух отдельных радиотехнических узлов (орту), дислоцированных в г. Мукачево и г. Севастополь. Радиолокационные станции — единственные средства СКАКО, которые обеспечивают непрерывный обзор (разведку) космического пространства и решение задач:

- по выявлению баллистических и космических объектов в полете;
- по сопровождению обнаруженных целей, измерению их координат с последующим определением параметров траекторий баллистических ракет (БР) и орбит космических объектов;
- по классификации целей, выделения сгорающих ИСЗ и атакующих БР, определения точек старта и падения БР.

Лоцируемые средствами НГО цели характеризуются малыми эффективными отражательными поверхностями и космическими скоростями полета. Это обуславливает острый дефицит времени при их обслуживании и требует полной автоматизации процесса функционирования РЛС. Поэтому РЛС 5Н86-М функционирует в автоматическом режиме в соответствии с комплексным рабочим (боевым) алгоритмом, реализованным на вычислительном комплексе [9].

РЛС НГО имеют дальность действия в несколько тысяч километров, что достигается за счет высокого потенциала РЛС НГО (приблизительно на три порядка выше, чем в РЛС обзора

воздушного пространства, которые работают в том же диапазоне волн). Реализация высокого потенциала стала возможной благодаря стационарному варианту выполнения РЛС.

Однако дислоцированные на территории Украины РЛС имеют низкие точностные характеристики и несовершенное алгоритмическое обеспечение для решения заданий ККП, что обусловлено их основным назначением — оперативным вскрытием факта нанесения ракетно-ядерного удара, а также моральным и физическим старением аппаратуры и программно-алгоритмического обеспечения. Начало эксплуатации узлов датируется 1976–1977 гг., дата выработки ресурса вооружения после второго продления — 2005 г.

Таким образом, вопрос получения оперативных и точных начальных условий движения КО в настоящее время следует считать проблемным.

Сложность ведения каталога КО заключается в получении в сжатые сроки точных баллистико-навигационных данных. Наиболее оптимальным решением данной проблемы является объединение всех информационно-разведывательных средств в единую систему и сосредоточение усилий на комплексном и взаимодополняющем применении наличных и перспективных средств. В связи с этим актуальным является вопрос создания радиолокационных комплексов и разработка нового математического обеспечения их функционирования с целью оперативного и достоверного оценивания параметров движения КА.

Исходя из поставленного задания, работу информационных средств СКАКО целесообразно организовать в два этапа. На первом этапе по результатам функционирования радиолокационных средств непрерывного наблюдения за КА (рис. 3) получается первичная, грубая оценка параметров орбиты объектов наблюдения. На основании этой информации формируются целеуказания (ЦУ) высокоточным средствам (например, квантово-оптической системе (КОС) «Сажень-С») для локации экстраполированной пространственной области нахождения объекта. По результатам работы этих средств (или совместной обработки информации грубых и точных

средств) на втором этапе происходит точное определение параметров орбит КО с использованием минимального количества проводок КО и последующее обновление данных каталога.

Анализ возможности формирования ЦУ для высокоточных измерителей по исходной информации РЛС НГО показал, что точностные характеристики ЦУ не удовлетворяют требованиям к такой информации. Причиной является грубое измерение угловых координат и несовершенство алгоритмического обеспечения для решения заданий контроля космического пространства (использование упрощенных математических моделей движения КО).

Один из возможных путей повышения точности ЦУ — информационное объединение нескольких грубых автономных измерителей в многопозиционные радиолокационные комплексы (МП РЛК). При этом благодаря общей обработке информации об объекте наблюдения достигается более высокая точность траекторных расчетов по сравнению с однопозиционными РЛС.

Цель работы — анализ точностных характеристик определения параметров движения КА при объединении украинских радиолокационных средств ККП (двух орту НГО в г. Севастополь и Мукачево и Центра ККП Национального центра управления и испытаний космических средств в г. Евпатория на рис. 1) в МП РЛК.

### АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

На рис. 4 показаны зоны действия дислоцированных в Украине РЛС НГО.

Зоны видимости РЛС НГО имеют общую область наблюдения, максимальное значение которой при оптимальной высоте полета КО составляет около 60 % от размера зоны наблюдения одной РЛС. Суммарная зона действия значительно превышает зону наблюдения автономной РЛС. Расстояние между измерительными средствами соизмеримо с дальностью до цели, что дает возможность создать на их основе большебазовый МП РЛК.

Преимущество некогерентного большебазового МП РЛК, состоящего из автономных РЛС, —

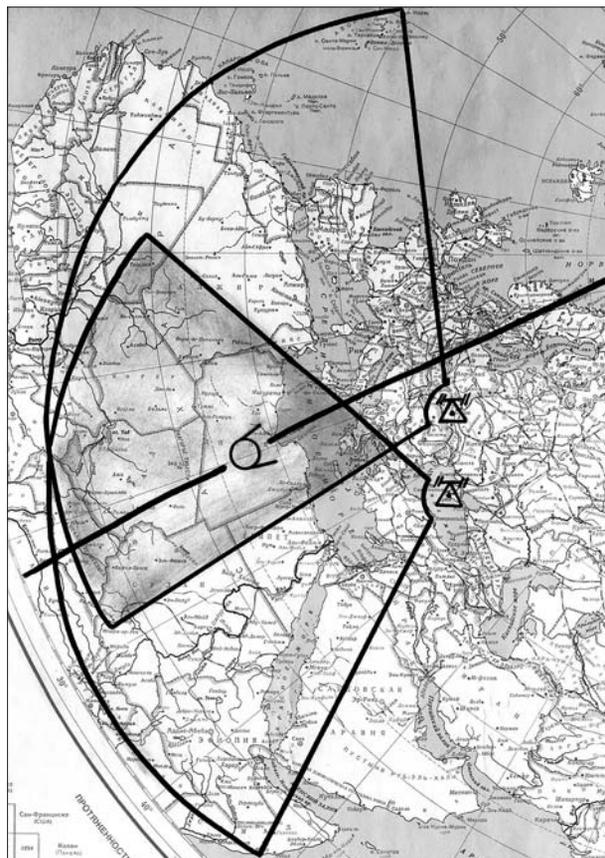


Рис. 4. Зоны действия дислоцированных в Украине РЛС НГО

получение любой из составляющих комплекса измерений всех пространственных координат независимо от других, отсутствие требований синхронизации работы РЛС, использование больших баз и избыточной информации, что дает возможность повысить точность определения оценок орбитальных параметров.

Ряд исследований [4–6], посвященных алгоритмам обработки траекторных измерений как автономной РЛС, так и в активном МП РЛК, показали значительное повышение оперативности и точности оценивания параметров движения КА. Рассматривался вариант получения оценок НУ движения КА на одном витке.

В табл. 2 приведены средние квадратичные погрешности  $\sigma_{|r|}$  и  $\sigma_{|v|}$  определения модулей радиуса-вектора и скорости КА для отдельной РЛС, а также МП РЛК, состоящих из двух или трех

РЛС типа 5Н86-М. Количество измерений координат КО каждой РЛС равно 30. В качестве объекта наблюдения был выбран КА типа «КХ-11».

Результаты имитационного моделирования показали, что совмещение зон сопровождения КА радиолокационных станций МП РЛК дает возможность более точно оценить вектор пространственного положения цели, поскольку на определенном участке полета имеется увеличенное количество измерений координат объекта. Разнесенные в пространстве зоны сопровождения дают возможность более точно оценить вектор скорости цели благодаря увеличению участка наблюдения за объектом. Подтверждена также зависимость результирующих оценок от типа траектории движения КА (чем больше отличается кинематическая модель движения КО на интервале сопровождения от линейной, тем точнее будут результаты оценивания при использовании динамической модели для сглаживания результатов наблюдений) и ориентации орбиты объекта относительно РЛС МП РЛК.

Существует концепция создания и развертывания орту НГО нового поколения на базе РЛС высокой заводской готовности. Поэтому в табл. 3 приведены результаты оценивания параметров движения КА типа «Січ-1» в МП РЛК при разных тактико-технических характеристиках (ТТХ) РЛС НГО. Проведенные исследования по вопросам многокритериальной оптимизации количества РЛС и структуры МП РЛК по-

**Таблица 2. Оценивание параметров движения КА типа «КХ-11» в зависимости от количества РЛС**

Состав МП РЛК	$\sigma_{ \vec{r} }$ , км	$\sigma_{ \vec{v} }$ , км/с
Одна РЛС 5Н86-М	4.4	$3 \cdot 10^{-2}$
Две РЛС 5Н86-М	1.3	$6.2 \cdot 10^{-3}$
Три РЛС 5Н86-М	0.19	$7.7 \cdot 10^{-4}$

**Таблица 3. Оценивание параметров движения КА типа «Січ-1» в зависимости от типа РЛС**

Состав МП РЛК	$\sigma_{ \vec{r} }$ , км	$\sigma_{ \vec{v} }$ , км/с
Три РЛС типа 5Н86-М	0.11	$3.4 \cdot 10^{-4}$
Две РЛС типа 5Н86-М + одна РЛС типа AN/FPS-108 («Кобра Дейн»)	0.063	$1.2 \cdot 10^{-4}$

казали, что наилучшим вариантом построения комплекса является три РЛС, расположенных в углах равностороннего треугольника. В связи с этим при математическом моделировании местами дислокации РЛС были выбраны г. Мукачево, г. Севастополь и г. Чернигов.

Нужно отметить, что при планировании применения отечественных КА наличные радиотехнические системы обеспечивают погрешности  $\sigma_{|\vec{r}|} = 20...40$  м,  $\sigma_{|\vec{v}|} = 1.5...3$  см/с при наблюдении КА на 6...8 витках, что составляет интервал 2...3 сут. Модернизация средств дает возможность определить параметры движения цели с такой же точностью по 3...4 виткам. Таким образом, данные табл. 3 показывают, что наблюдение за КА с помощью МП РЛК ненамного уступают по точности радиотехническим средствам, которые обслуживают только «свои» аппараты, но значительно превышает их по оперативности. Кроме того, следует заметить, что проведенные исследования не исчерпывают возможности повышения точности определения параметров движения КА. Так, например, путем решения многоточечной краевой задачи были получены результаты определения НУ. Они указывают на возможность повышения точности оценивания при учете общих зон сопровождения, если на предварительном этапе обработки измерительной информации точно оцениваются угловые скорости движения КА (благодаря избыточности информации и измерения координат с пространственно разнесенных позиций) и затем дополнительно учитываются при решении краевой задачи. Еще одним вариантом является объединение информации на двух витках.

Другими направлениями повышения информативности средств СКАКО является:

- дополнение одной из РЛС (например, РЛС в г. Севастополь) выносным приемным пунктом, созданным на современной радиоэлектронной базе;
- создание многопозиционной информационной системы на основе разнотипных средств, способных вести сопровождение КА, например, РЛС 5Н86-М и КОС «Сажень-С».

Конкретный состав и ТТХ каждой составляющей МП РЛК должны определяться задания-

ми, возложенными на информационные средства, и требованиями потребителей информации. Отмечая необходимость оперативного и точного определения параметров движения КА при решении заданий национальной безопасности и обороны, нужно отметить, что МО Украины и другие заинтересованные структуры на данный момент не могут выдвигать разработчикам жесткие требования по этим параметрам, поскольку не финансируют эти разработки. Последнее следует из анализа Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2008–2012 г. [3].

При оценивании эффективности информационных средств целесообразной является замена параметра точности определения НУ движения КА на параметры влияния информации о движении КА на качество выполнения целевых заданий, например:

— выдача ЦУ высокоточному измерительному средству типа КОС «Сажень-С» (вероятность захвата на сопровождение КА КОС  $P_{КОС}$ );

— планирование применения КА ДЗЗ высокой разрешающей способности (вероятность накрытия полосой съемки заданного района  $P$ ).

Результаты расчетов по первому параметру представлены на рис. 5, где рис. 5, *a* отображает случай получения ЦУ по результатам сопровождения КА типа «Січ-1» автономной РЛС 5Н86-М, рис. 5, *б* — однобазовым МП РЛК, состоящим из наличных РЛС 5Н86-М.

На рис. 6 представлены результаты расчета вероятности  $P$  накрытия участка на поверхности Земли размером  $10 \times 10$  км полосой съемки КА ДЗЗ шириной 10 км в зависимости от временного интервала планирования съемки  $T_n$ , нормированного на период вращения КА. Рис. 6, *a* характеризует случай сопровождения КА автономной РЛС 5Н86-М, рис. 6, *б* — большебазовым МП РЛК в составе двух РЛС 5Н86-М. Так, при значении  $P = 0.7$  качественное планирование заданий КА ДЗЗ высокого разрешения может быть для однобазового МП РЛК практически на виток. По результатам математического моделирования можно сделать вывод, что сопровождение КА средствами МП РЛК позволяют с высокой эффективностью выполнить задачу

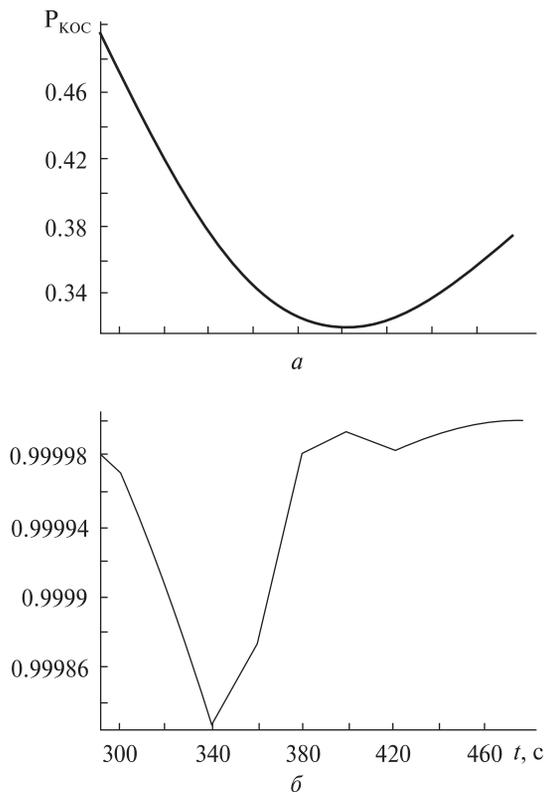
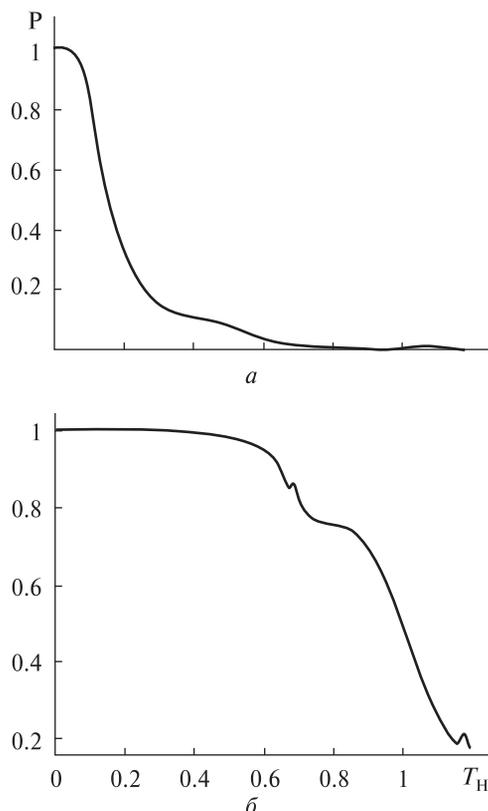


Рис. 5. Вероятность  $P_{КОС}$  захвата КА на сопровождение: *a* — по результатам сопровождения КА типа «Січ-1» автономной РЛС 5Н86-М, *б* — однобазовым МП РЛК, состоящим из наличных РЛС 5Н86-М

выдачи ЦУ высокоточному средству, а также эффективно планировать применение КА ДЗЗ при условии учета перечисленных выше положений.

Все варианты решения задачи оперативного и точного ведения (обновления) каталога КО предусматривают высококачественное функционирование РЛС НГО как средства ведения ККП. Анализ современного технического состояния РЛС 5Н86-М показывает, что параметры и основные характеристики вооружения находятся в заданных рамках и отвечают требованиям эксплуатационной документации, за исключением части специального технического обеспечения, например холодильных машин, вентиляторов и тому подобное.

Поскольку РЛС 5Н86-М исчерпали назначенный срок службы, возникает вопрос о после-



**Рис. 6.** Вероятность  $P$  накрытия участка на поверхности Земли размером  $10 \times 10$  км полосой съемки КА ДЗЗ шириной 10 км в зависимости от временного интервала планирования съемки  $T_n$ , нормированного на период вращения КА:  $a$  – случай сопровождения КА автономной РЛС 5Н86-М,  $b$  – большебазовым МП РЛК в составе двух РЛС 5Н86-М

дующей судьбе этих уникальных средств. Для развития космической отрасли в Украине необходимо сохранить РЛС НГО — основу национальной СКАКО.

Известны варианты решения проблемы, когда техническое средство устаревает физически и морально [1]:

- создание нового образца;
- глубокая модернизация существующего образца;
- создание нового образца через модернизацию РЛС.

Последний вариант позволяет решать две задачи: во-первых, продление срока службы и

«подтягивание» характеристик конкретного образца техники к заданным и, во-вторых, возрождение национальной дальней радиолокации. При таком подходе выбираются только те направления модернизации, которые при приемлемом уровне расходов позволяют эффективно решить оба задания, то есть вместе с продлением срока службы РЛС заложат основу стратегических решений, которые будут затем использованы при создании РЛС высокой заводской готовности.

В работе [1] определены перспективные направления модернизации национальных РЛС НГО. Она позволит повысить надежность и функциональность РЛС, снизить эксплуатационные расходы и создать значительный научно-технический задел в разработке и создании РЛС высокой заводской готовности.

Модернизация аппаратной и алгоритмической компонент РЛС 5Н86-М в целях повышения ее точностных характеристик и продления эксплуатационного ресурса является необходимой и такой, что технически может быть реализована даже в условиях экономического и финансового кризиса.

Космическая деятельность государства несет в себе важную системную функцию мультипликатора развития национальной высокотехнологичной экономики. Она выражается в объединении результатов развития многих других отраслей национальной промышленности, и одновременно выдвигает к ним, а также к теоретической науке и техническому образованию новые, более высокие требования, которые стимулируют переход на существенно новый технологический уровень [2]. Если государственные потребности в космических средствах и услугах не будут обеспечены путем создания и развития украинских космических средств, они будут удовлетворяться приобретением услуг на мировом рынке. Это потребует больших экономических расходов, значительно уменьшит возможности для инновационного развития отечественной экономики, увеличит отставание Украины от наиболее развитых стран мира и существенно отразится на уровне национальной безопасности и обороны.

## ВЫВОДЫ

Эксплуатируемые в Украине РЛС НГО являются основой национальной СКАКО. Для удовлетворения возросших требований потребителей информации каталога КО к точности и оперативности получения оценок начальных условий движения КА целесообразным является создание большебазовых некогерентных МП РЛК на базе автономных активных РЛС НГО. Такое построение даст возможность максимально эффективно использовать при оценивании и прогнозировании космической обстановки информацию, которая содержится в пространственной структуре отраженного от КА электромагнитного поля, а также повысит эффективность применения по целевому назначению отечественных КА.

Модернизация существующих РЛС СКАКО и создание в перспективе РЛС высокой заводской готовности позволит Украине не только быть в числе ведущих космических стран мира, но и стимулировать развитие высокотехнологических отраслей экономики, сберечь и приумножить интеллект нации.

1. Андреев Ф. М., Ковкин В. В., Статкус А. В. Состояние и перспективы развития национальных средств надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов // Прикладная радиоэлектроника. — 2005. — 4, № 3. — С. 263–268.
2. Афанасьев И. А. Космонавтика и власть // Новости космонавтики. — 2008. — № 2. — С. 58–62.
3. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008–2012 роки. — Київ: Національне космічне агентство України, 2008. — 86 с.
4. Ковбасюк С. В., Ракушев М. Ю. Расчет частных производных от текущих элементов орбиты по начальным условиям движения космического аппарата на основе многомерных дифференциальных преобразований // Двойные технологии. — 2004. — № 2. — С. 15–18.
5. Ковбасюк С. В., Стефанович В. И. Алгоритм объединения информации о параметрах движения космического аппарата в активном многопозиционном радиолокационном комплексе // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. — 2007. — № 2 (41). — С. 90–95.
6. Ковбасюк С. В., Шестаков В. И. Оценивание точности определения пространственного положения лоцируемого объекта в многопозиционных РЛС // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1999. — № 10. — С. 18–23.
7. Космічне право України: Зб. національних і міжнародних правових актів. — К.: Атака, 2004. — 440 с.
8. Пательцев П. Охота за невидимками по-французски // Новости космонавтики. — 2007. — № 8. — С. 41.
9. Радиотехнические станции надгоризонтного обнаружения войск ПРН / Под ред. Ф. М. Андреева. — Харьков: ВИРТА, 1983. — 444 с.

Надійшла до редакції 25.05.09

F. M. Andreev, S. V. Kovbasyuk

## POSSIBILITIES OF MULTIPOSITION COMPLEX CREATED ON THE BASIS OF NATIONAL EARLY WARNING RADARS

The necessity and possibility of complex use of the Early Warning Radars are examined. Major attention is given to the most effective use of existing facilities. The prospects of development of this direction of space industry are briefly discussed.

**АНДРЕЄВ Фелікс Михайлович** — професор Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, доктор технічних наук, Заслужений винахідник України.

Напрямок науки — радіолокація складних (групових) цілей, напівнатурні випробування радіотехнічних систем.

**АПОСТОЛОВ Олександр Анатолійович** — молодший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — інформатика та програмування, дистанційне дослідження Землі.

**БЕЛОБРОВА Марія Володимирівна** — старший науковий співробітник Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — математичне моделювання процесів розсіяння радіохвиль різними видами земної поверхні.

**БОЄВ Анатолій Григорович** — провідний науковий співробітник Інституту радіоастрономії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — гідродинаміка, фізика плазми, астрофізика.

**БОВОРИЦЬКИЙ Володимир Миколайович** — доцент кафедри оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент.

Напрямок науки — цифрові оптико-електронні системи формування зображень, цифрова обробка зображень.

**ВОЙЦЕХОВСЬКА Анна Дмитрівна** — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

**ВОЛОВИК Дмитро Володимирович** — провідний інженер лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — розробка електронної і мікропроцесорної апаратури, програмування.

**ГЕРАСИМЕНКО Світлана Володимирівна** — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

**ДЗЮБАНОВ Дмитро Анатолійович** — заступник директора Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — морфологія іоносфери, фізичні процеси в іоносферній F-області, моделювання іоносфери.

**ДОМНІН Ігор Феліксович** — директор Інституту іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, доктор технічних наук, доцент.

Напрямок науки — інформаційні технології.

**ЖОЛОБАК Галина Михайлівна** — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, доцент.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

**КАБАНОВ Олександр Валентинович** — науковий співробітник Центру радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — програмування та обробка радіофізичної інформації.

**КОВБАСЮК Сергій Валентинович** — провідний науковий співробітник наукового центру Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова Національного авіаційного університету, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — розробка та удосконалення складних інформаційно-розвідувальних систем.

**КОТОВ Дмитро Володимирович** — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, асистент кафедри радіоелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Напрямок науки — геофізика, іоносфера, іонний склад іоносфери, метод некогерентного розсіяння.

**КРИШТАЛЬ Олександр Нектарійович** — завідувач відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика, фізика Сонця, фізика плазми.

**КУЗЬКОВ Володимир Павлович** — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — прилади і дослідження в ІЧ-діапазоні, системи лазерного зв'язку, вплив атмосфери на розповсюдження лазерного випромінювання.

**КУЗЬКОВ Сергій Володимирович** — інженер лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — моделювання систем наведення і супроводження космічних об'єктів; наземно-космічні системи лазерного зв'язку, волоконно-оптичні та відкриті оптичні системи зв'язку, прикладна електроніка.

**МАКАРОВА Ганна Анатоліївна** — директор Миколаївського обласного державного проектно-технологічного центру охорони родючості ґрунтів і якості продукції, кандидат сільськогосподарських наук.

Напрямок науки — екологія, ґрунтознавство.

**МАТВЄЄВ Олександр Якович** — учений секретар Центру радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі радіофізичними методами, обробка і інтерпретація радіофізичної інформації.

**МІХЕСНКО Леонід Андрійович** — доцент кафедри оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», кандидат технічних наук, доцент.

Напрямок науки — оптична радіометрія та метрологія, системи калібрування оптико-електронних систем космічного базування.

**ПУЛЯЄВ Валерій Олександрович** — заступник директора з наукової роботи Інституту іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, професор кафедри радіоелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», доктор технічних наук.

Напрямок науки — методи обробки випадкових сигналів, фізика іоносфери в природно та штучно збуреному стані.

**ПУХА Сергій Петрович** — завідувач лабораторії СКБ «Шторм» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрямок науки — розробка електронної апаратури системи наведення та супроводження.

**САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч** — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень

Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геолого-мінералогічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

**СОДНІК Зоран** — провідний спеціаліст Європейського центру науково-технологічних досліджень (ESTEC) Європейського космічного агентства (ESA).

Напрямок науки — наземно-космічні системи лазерного зв'язку.

**СОЛОВІЙОВ Олександр Анатолійович** — завідувач лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Російської академії наук (Пулково), доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — астрофізика, фізика Сонця, магнітна гідродинаміка.

**ЦИМБАЛ Валерій Миколайович** — директор Центру радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі радіофізичними методами, обробка і інтерпретація радіофізичної інформації.

**ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович** — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, лауреат Премії МВССО СРСР, лауреат Премій Ради Міністрів СРСР.

Напрямок науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погода.

**ШАМОТА Марія Олександрівна** — аспірант кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — космічна радіофізика, варіації геомагнітного поля.

**ЮЩЕНКО Максим Володимирович** — провідний інженер Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — географія, картографічна адаптація супутникових знімків, дистанційне дослідження Землі.

### КОСМІЧНІ МІСІЇ ЯПОНІЇ ЗА СТАНОМ НА БЕРЕЗЕНЬ 2009 р. (за даними бюлетеня КОСПАР Space Research Today, № 175, 2009)

**KAGUYA** (Selene): перший великий японський місячний зонд, запущений ракетою Н-ПА 14 вересня 2007 р. Головні цілі місії: пізнати походження і еволюцію Місяця з допомогою 14 наукових інструментів, встановлених на борту космічного корабля. Номінально місія *Kaguya* завершилась в жовтні 2008 р. Були отримані глобальні стерео зображення місячної поверхні з розділенням 10 м, кольорові дані — 20 м, дані глобальної топографії з використанням лазерного альтиметра, дані глобального гравітаційного поля включаючи зворотний бік Місяця, елементно/мінералогічний склад, поверхневу і під поверхневу структуру і інформацію про магнітне поле. *Kaguya* також дослідив плазмове довкілля Місяця, місячну атмосферу і екзосферу Землі.

**HAYABUSA** продовжив орбітальний маневр на другому етапі від лютого 2009 р., націленому на повернення на Землю в 2010 р.

**AKEBONO, GEOTAIL, REIMEI** продовжили спостереження верхньої атмосфери Землі і магнітосфери.

**Hinode** (SOLAR-B) був запущений у вересні 2006 р. на сонячно-синхронну орбіту, яка дає змогу проводити тривалі неперервні спостереження Сонця. На борту *Hinode* знаходяться три телескопи: сонячний оптичний телескоп (SOT), EUV Imaging Spectrometer (EIS) і рентгенівський телескоп (XRT). Очікується, що комбінація цих телескопів забезпечить ключові спостереження для розуміння механізмів зародження, розповсюдження і розсіювання магнітної енергії, співвідношення між корональним нагріванням і під-фотосферною магнітною активністю, а також широким різноманіттям фундаментальних магнітодинамічних (MHD) процесів. *Hinode* залишається працездатним, продовжує отримувати дані високої якості і нині очікує на черговий максимум сонячної активності.

**SUZAKU** (ASTRO-E2), п'ятий в серії японських рентгенівських супутників, був запущений ракетою-носієм М—V 10 липня 2005 р. Наукове спорядження було розроблено JAXA (космічне агентство Японії — прим. ред.) і багатьма іншими японськими інституціями в співробітництві з NASA/GSFC. Головною особливістю *Suzaku* є його прекрасна рентгенівська спектральна чутливість, з його високою пропускну здатністю вище широкому-

гової енергії області від 0.2 до 600 кеВ. Широка смуга пропускання, низький фон і добре енергетичне розділення робить його унікальним інструментом для розв'язку ряду важливих проблем астрофізики. Спостережна програма програма стартувала на початку квітня 2006 р. З того часу за програмою була виконана більшість (понад 90 %) спостережень. За результатами спостережень *Suzaku* уже опубліковано понад 150 статей в реферованих журналах і очікується, що їх кількість буде стрімко збільшуватись.

**AKARI** (ASTRO-F), перший японський супутник, присвячений інфрачервоній астрономії, був запущений 21 лютого 2006 р. *Akari* оснащений 68.5 см охолодженим телескопом, разом з двома іншими інструментами: IRC (інфрачервона камера) і FIS (Far-Infrared Surveyor). Спостереження з рідким гелієм розпочались 8 травня 2006 р. і завершилися 26 серпня 2007 р. після випарування рідкого гелію. Протягом періоду «холодних спостережень» *Akari* здійснив огляд всього неба покривши 94 % всього неба в шести діапазонах довжин хвиль від середніх до далеких інфрачервоних зі значно кращим просторовим розділенням ніж це було досягнуто в попередньому огляді неба, виконаному IRAS. *Akari* також виконав понад 5000 індивідуальних точних спостережень в знімальному і спектроскопічному режимах в діапазоні довжин хвиль 2—180 мкм. Попередня версія каталогу *Akari* складається з двох частин: «mid-infrared» каталог в 9 і 18 мкм, який містить близько 700000 джерел і «far-infrared» каталог, який налічує 64000 джерел, вимірених в чотирьох довжинах хвиль: 65, 90, 140 і 160 мкм. Обидва каталоги містять майже в три рази більше джерел, ніж в каталозі огляду IRAS. Очікується, що каталог *Akari* сприятиме виконанню багатьох майбутніх астрономічних досліджень. Об'єкти, на яких були зосереджені спостереження *Akari* — це об'єкти від Сонячної системи до далеких галактик і космічного ІЧ-фону. Деякі попередні результати були опубліковані в двох спеціальних випусках *Publications of Astronomical Society of Japan* (PASJ) та інших журналах.

Після випарування рідкого гелію, *Akari* був переведений в «теплу фазу спостережень» з допомогою близької ІЧ-частини IRC, яка може оперувати в умовах, забезпечених бортовими механічними охолоджувачами.