

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 17
4 + 2011

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

ЗМІСТ

Мищенко А. В., Пироженко А. В. Аналіз моделі взаємодії електродинамічних тросових систем з магнітосферою і іоносферою Землі

Дудник А. В., Подгурски П., Сильвестер Я., Гбурек С., Ковалински М., Сиарковски М., Плоциеньяк С., Бонкала Я. Исследования электронных поясов в земной магнитосфере с помощью рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф: предварительные результаты

Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Харитонов С. В., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20–21 января 2010 г.

Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования

Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Кінематичні характеристики вересневих метеорів за базисними телевізійними спостереженнями 2003 року

Каблак Н. І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних

CONTENTS

5 *Mishchenko A. V., Pirozhenko A. V.* The analysis of interaction model of electrodynamic tether systems with the Earth's magnetosphere and an ionosphere

14 *Dudnik O. V., Podgorski P., Sylwester J., Gburek S., Kowalinski M., Siarkowski M., Plocieniak S., Bakala J.* Investigation of electron belts in the Earth's magnetosphere with the help of X-ray spectrophotometer SphinX and satellite telescope of electrons and protons STEP-F: preliminary results

26 *Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Pazura S. A., Kharytonova S. V., Chernogor L. F.* Dynamic processes in the ionosphere during the very moderate magnetic storm on 20–21 January 2010

41 *Chernogor L. F., Barabash V. V.* The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of 4 January 2011 in Kharkiv: some results of vertical sounding

53 *Kozak P. M., Rozhylo O. O., Taranukha Yu. H., Kruchynenko V. H.* Kinematical characteristics of september meteors from double-station TV-observations in 2003

65 *Kablak N. I.* Monitoring of besieged water vapor on the basis of the processing of GNSS data

Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Процюк Ю. И., Вирун Н. В., Кашуба С., Пихун А. И., Андриевский С. М., Мажяев А. Э., Казанцева Л. В., Шляпников А. А., Шульга А. В., Золотухина А. В., Сергеева Т. П., Мирошниченко А. П., Андронов И. Л., Бреус В. В., Вирнина Н. А. Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Современное состояние и перспективы развития объединенного архива наблюдений **74**

Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., Virun N. V., Kashuba S. G., Pikhun A. I., Andrievsky S. M., Mazhaev A. E., Kazantseva L. V., Shlyapnikov A. A., Shulga A. V., Zolotukhina A. V., Sergeeva T. P., Miroshnichenko A. P., Andronov I. L., Breus V. V., Virmina N. A. Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO). Current state and development prospects for the joint archive of observations

ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ

До 80-річчя від дня народження академіка НАН України В. І. Лялька **92**

80th birthday of Academician of NAS of Ukraine V. I. Lyalko

НАШІ АВТОРИ

94 OUR AUTHORS

FIGURES OF SPACE INDUSTRY

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

Підписано до друку 22.07.11. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 10,08. Обл.-вид. арк. 10,58. Тираж 100 прим. Зам. № 3037.

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.

*1 вересня 2011 р. виповнюється 80 років
академікові Національній академії наук України
Вадиму Івановичу ЛЯЛЬКУ*

*Редакційна колегія журналу
сердечно вітає Вадима Івановича з ювілеєм
і зичить йому міцного здоров'я та наснаги для
здійснення всіх його творчих задумів*

УДК 629.7.087.22

А. В. Мищенко, А. В. Пироженко

Інститут технічної механіки Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ С МАГНИТОСФЕРОЙ И ИОНОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

Проаналізовано модель взаємодії електродинамічної космічної тросової системи з іоносферою та магнітосферою Землі. Розглядаються особливості розв'язання рівнянь моделі і їхня залежність від граничних умов на кінцях троса. Обговорюються питання моделювання впливу додаткових контакторів на вольтамперні характеристики електродинамічної космічної тросової системи. Розглядаються завдання подальших досліджень.

ВВЕДЕНИЕ

Космические тросовые системы (КТС) на протяжении десятков лет рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития космонавтики [2, 14, 21, 22]. В последние годы большое внимание исследователей уделяется электродинамическим КТС (ЭДКТС) и их использованию для создания эффективных средств увода отработавших свой срок космических аппаратов и ступеней ракет-носителей с низких околоземных орбит [13 — 15, 19, 21, 25 — 27]. Применение ЭДКТС для решения этих задач представляется многообещающим и очень выгодным [1, 2, 13, 15, 16, 19, 20, 25 — 27].

Важность задач, для решения которых перспективно использование ЭДКТС, обусловила широкие исследования этого направления. Интенсивные исследования задач функционирования ЭДКТС на низких околоземных орбитах длятся уже более двух десятков лет [2, 14, 15, 21, 22]. Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают перспективность ЭДКТС и расширяют возможности ее эффективного применения для различных технических приложений, а с другой — позволяют глубже осознать сложность проблемы.

Создание эффективных ЭДКТС связано с решением сложных взаимосвязанных проблем динамики космических тросовых систем, физики плазмы, электродинамики, механики и физики космического полета, термодинамики. Сложный междисциплинарный характер исследуемых задач, тонкие специфические эффекты, проявляющиеся в ЭДКТС и оказывающие на ее работу существенное влияние, — это те причины, которые, по-видимому, обуславливают не такой быстрый, как первоначально ожидалось, прогресс в разработках. Вместе с тем эти же причины, как представляется, обуславливают красоту и привлекательность задачи создания ЭДКТС.

Если рассматривать проблему увода космического мусора, то основное внимание в исследованиях уделяется гравитационно стабилизированной ЭДКТС [13, 25 — 27]. К настоящему времени в этих исследованиях получено большое количество содержательных результатов. Предложена модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой, и показана эффективность оголенного провода для собирания из ионосферы электронного тока [13, 24, 26]. Показана и экспериментально подтверждена возможность использования полых катодов для замыкания цепи большого тока ЭДКТС [22, 23]. Вместе с тем результаты исследования динамики ЭДКТС показывают неустойчивость ее радиального положения, свя-

занную с резонансами колебаний системы относительно центра масс и действием амперовых [2, 21] и аэродинамических [2, 7] моментов. Эта неустойчивость существенно затрудняет реализацию проекта создания эффективной системы увода на основе радиальной ЭДКТС. Известные предложения по управлению процессами стабилизации углового движения радиальной ЭДКТС не только существенно усложняют техническую реализацию проекта, но и не являются вполне обоснованными. Так, в предложении создания ЭДКТС, в которой усредненный момент амперовых сил равен нулю [25, 27], не учтен резонансный характер колебаний и аэродинамическая неустойчивость. Предложения по стабилизации углового движения за счет управления током в тросе основаны на предположении, что модель собирания тока и прохождения его по тросу известна [21, 25]. Отметим, что в последнее время появился интересный, в определенном плане альтернативный, проект вращающейся ЭДКТС для сбора и увода космического мусора [15] и (www.star-tech-inc.com/id121.html).

К настоящему времени экспериментальная база исследований ЭДКТС достаточно ограничена. Эксперимент TSS-1R показал возможность собирания в ионосфере больших токов [22]. Этот же эксперимент показал некорректность известных на то время моделей взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. Экспериментальные данные силы тока превысили расчетные в 2–3 раза. Эксперимент PMG показал возможность использования полых катодов для достижения в тросе больших токов [22, 23]. Там же была показана существенная зависимость тока в тросе от концентрации заряженных частиц в окружающей ионосфере. Отсюда с учетом модели [5] или (International Reference Ionosphere: <http://iri.gsfc.nasa.gov/>) изменения концентрации частиц в ионосферной плазме при орбитальном движении ЭДКТС немедленно следует резонансная неустойчивость колебаний троса перпендикулярно к плоскости орбиты. В настоящее время европейскими, японскими, американскими и австралийскими учеными готовится совместный проект космического эксперимента ЭДКТС на ракетном зонде [18]. В этом эксперименте пла-

нируется проверка возможности применения неизолированного троса для ЭДКТС, а также возможности применения модели орбитально ограниченного тока как расчетной.

Представляется, что развитие столь перспективного направления, как ЭДКТС, будет набирать все более широкий характер международных исследований. Эти исследования в первую очередь должны быть направлены на получение достоверных экспериментальных данных. Важными представляются и усилия по преодолению трудностей, связанных с междисциплинарным характером задач.

В работе проводится анализ наиболее распространенной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли. Целью анализа является определение вопросов, требующих дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Авторы считают себя специалистами в динамике космического полета и надеются, что их усилия будут не напрасны для преодоления трудностей, связанных с междисциплинарным характером задач ЭДКТС.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Для описания принципов функционирования ЭДКТС введем правую прямоугольную инерциальную систему координат (ИСК) $O_3 X_u Y_u Z_u$ с началом в центре масс Земли O_3 , ось $O_3 Z_u$ направлена по оси вращения Земли, ось $O_3 X_u$ – в точку весеннего равноденствия.

Рассмотрим движение КТС как однородного проводника по низкой околоземной орбите (рис. 1). Как известно [11], движение в ИСК магнита, среды или самого проводника приводит к движению или перераспределению зарядов в проводнике, обусловленному электродвижущими силами (ЭДС) индукции. В дальнейшем ЭДС индукции, обусловленной вращением Земли как магнита, будем пренебрегать.

Выражение для силы Лоренца, действующей на заряды КТС, запишем в виде [11]

$$\mathbf{F}_л = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

где q — заряд частицы КТС, \mathbf{v} — скорость движения заряженных частиц ЭДКТС в ИСК, в пер-

вом приближении примем $\mathbf{v} = \mathbf{V}_\infty$, \mathbf{V}_∞ — скорость движения центра масс КТС в ИСК, $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_T$ — суммарная напряженность электрического поля, \mathbf{E}_0 — напряженность электрического поля в окружающей среде, \mathbf{E}_T — напряженность электрического поля, обусловленная зарядами в проводнике, \mathbf{B} — индукция магнитного поля Земли.

Для низкой околоземной орбиты считается [10], что атмосфера полностью увлекается вращением Земли. Тогда можно предположить, что вследствие движения заряженных частиц ионосферы в магнитном поле Земли возникает электрическое поле, напряженность которого в окрестности КТС с большой точностью описывается формулой [19, 21, 25]

$$\mathbf{E}_0 = -\mathbf{v}_{pl} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_{pl} = \boldsymbol{\omega}_E \times \mathbf{R}$ — скорость движения заряженных частиц плазмы в ИСК вследствие вращения Земли, $\boldsymbol{\omega}_E$ — угловая скорость вращения Земли, \mathbf{R} — радиус-вектор центра масс КТС.

Однако это предположение трудно признать оправданным, поскольку напряженность электрического поля в ионосферной плазме определяется другими, гораздо более сложными процессами [4].

Далее будем рассматривать трос как одномерную структуру, распределенную вдоль отрезка прямой. Тогда действие сил Лоренца на заряды проводимости троса определяется проекцией (1) на линию троса.

Под действием на электроны проводимости ЭДКТС силы Лоренца происходит перераспределение зарядов: одна часть КТС приобретает положительный заряд, другая — отрицательный. Если бы ЭДКТС не взаимодействовала с зарядами окружающей плазмы (двигалась в вакууме), то перераспределение зарядов происходило бы до тех пор, пока электрическая составляющая силы Лоренца не уравновесила бы магнитную. Напряженность равновесного электрического поля, обусловленного зарядами в проводнике, в этом случае была бы равной $E_T = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$, где E_T — проекция \mathbf{E}_T на касательную к оси троса \mathbf{e}_x .

Следует отметить, что здесь идет речь о квазиравновесной напряженности, обусловленной

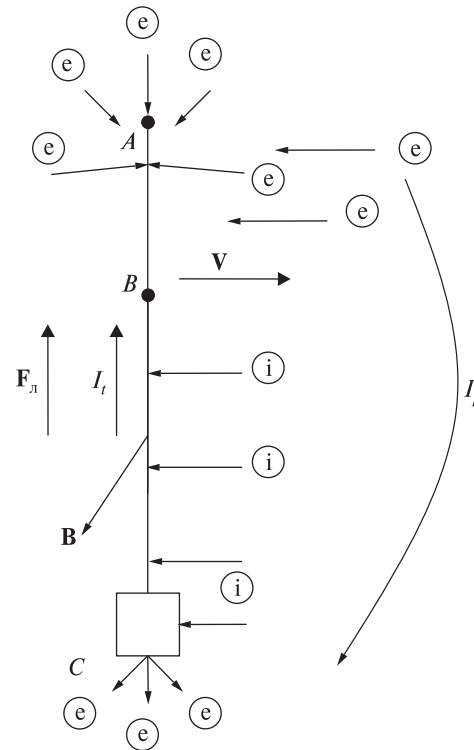


Рис. 1. Схема функционирования электродинамических космических тросовых систем

распределением зарядов. Движение КТС по орбите и ее движение относительно центра масс, вообще говоря, приводило бы, в силу изменений \mathbf{B} , \mathbf{v} и \mathbf{e}_x , к перераспределению зарядов в КТС, т. е. возникновению токов. Несмотря на незначительность этих токов, их влияние на эволюцию движения системы могло бы быть существенным, поскольку возникающие при этом силовые воздействия носят диссипативный характер.

Отметим также, что задача расчета распределения на проводнике зарядов, возникающего вследствие действия ЭДС индукции, несмотря на кажущуюся ее простоту, является далеко не тривиальной.

При движении ЭДКТС в ионосфере (состоящей из ионов и электронов) положительная часть системы будет собирать электроны, отрицательная — ионы, и в тросе будет течь ток. На проводник с током, находящийся в магнитном поле Земли, в свою очередь, действует перпен-

дикулярная к тросу сила Лоренца. Если ЭДКТС пересекает магнитные силовые линии перпендикулярно к их направлению (движение в плоскости магнитного экватора), то вся сила направлена на торможение движения. В ином случае возникают силы, направленные перпендикулярно к плоскости орбиты, которые могут быть причиной раскачивания ЭДКТС относительно плоскости орбиты.

АНАЛИЗ МОДЕЛИ

В настоящее время наиболее перспективными считаются ЭДКТС, имеющие в своей конструкции неизолированные ленту или трос. Неизолированный трос в таких системах играет роль контактора с плазмой (анода), собирающего электроны. Дж. Санмартин [26] показал, что ЭДКТС с оголенным тросом позволяют собирать в плазме большой электронный ток. В системах с изолированным тросом в качестве анода предполагается использовать большие металлические поверхности, при расчете тока на которые необходимо учитывать влияние магнитного поля на электроны ионосферы. Собираемый поверхностью ток в этом случае сокращается магнитным полем Земли почти в два раза [3] по сравнению с током, собираемым той же поверхностью без учета влияния магнитного поля на заряды.

Несмотря на очевидное преимущество для собирания тока, в ЭДКТС с неизолированным тросом действие электродинамической силы неравномерно распределено вдоль троса. Это может привести к раскачиванию системы. В ЭДКТС с изолированным тросом сила тока постоянна вдоль проводника, вследствие чего равномерно вдоль него действие электродинамических сил. Однако массовая несимметричность системы может также привести к ее раскачиванию за счет действия моментов.

Далее будем рассматривать ЭДКТС с неизолированным тросом.

Для построения модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой рассмотрим бесконечно малый отрезок цилиндрического троса dx , где x — координата оси троса. Поступающие на этот участок внешние заряды снижают равновесное электрическое поле E_r проводника.

Вследствие этого под действием ЭДС индукции по нему течет ток. Связь между током и изменением разности потенциалов определяется законом Ома [15]

$$\frac{dU}{dx} = \frac{I(x)}{\sigma A_t} - E_m, \quad (3)$$

где U можно рассматривать как разность потенциалов между тросом и плазмой, $I(x)$ — ток, текущий через данную точку троса, σ — электрическая проводимость троса, A_t — площадь поперечного сечения троса, E_m — проекция суммарной напряженности внешнего электрического поля и электрического поля, возникающего вследствие действия магнитной составляющей силы Лоренца на заряды проводника. С учетом (2) [19, 21, 25] эта проекция равна

$$E_m = -((\mathbf{V}_\infty - \omega_E \times \mathbf{R}) \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$$

Однако с учетом вышеизложенных рассуждений можно принять $E_m = -(\mathbf{V}_\infty \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_x$, что соответствует [15, 24, 26, 27].

Собираемый электронный ток рассчитывается на основе зондовой теории для орбитально ограниченного тока [6, 12] для цилиндрических зондов

$$\frac{dI}{dx} = \frac{2p_t j_{oe}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eU(x)}{kT_e} + 1}, \quad (4)$$

где I — ток, поступающий с плазмы на зонд, p_t — периметр поперечного сечения зонда, $j_{oe} = en\sqrt{kT_e}/(2\pi m_e)$ — плотность теплового электронного тока окружающей невозмущенной плазмы (хаотический ток электронов), n — концентрация заряженных частиц в невозмущенной плазме, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд электрона, T_e , m_e — температура и масса электрона, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Для расчета собираемого электронного тока для достаточно длинных тросов при больших электрических потенциалах в работах [13, 24, 26] принимается упрощение

$$\frac{dI}{dx} = \frac{enp_t}{\pi} \sqrt{\frac{2eU(x)}{m_e}}. \quad (5)$$

В работе [17] показано, что выражения (4), (5) подходят для расчета тока на цилиндры с ради-

усами, не превышающими дебаевский ($r_i \leq \lambda_D$). Если радиус троса больше дебаевского ($r_i > \lambda_D$), рассчитанные значения тока начинают расходиться с экспериментальными данными.

Собирание ионного тока на отрицательно заряженный участок троса, в соответствии с той же теорией, описывается выражением, аналогичным (5). Для ионного тока выражение, стоящее в правой части, нужно умножить на коэффициент $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$, где m_i — масса иона. В работах [13, 26] используется коэффициент $\varepsilon = \sqrt{m_e / m_i}$, однако следует заметить, что скорость ионов, в отличие от электронов, значительно меньше орбитальной скорости системы. Ионы налетают на трос только с одной стороны, и площадь собирания будет равна не $2\pi r_i I$, как для электронов, а $2r_i I$, что меньше в π раз. Значит, коэффициент перехода будет равен $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$.

Предполагая, что весь собранный предшествующим участком троса в плазме ток равен току, протекающему через данную точку $I(x)$, получим замкнутую систему уравнений (3), (5) для анодной части троса. Для катодной части уравнения аналогичны.

Уравнения (3), (5) являются основной частью общепризнанной модели взаимодействия ЭДКТС с ионосферной плазмой. В работах [13, 24, 26] вывод этих уравнений осуществлен с помощью специальной теории относительности. При этом осуществляется переход в систему координат, связанную с тросом, как инерциальную систему координат. Такой подход представляется не совсем удачным. И не только потому, что он очень необычен для специалистов по динамике. Такой подход не учитывает разные скорости электронов и ионов в ионосферной плазме и их качественное отличие от орбитальной скорости КТС. Этот подход требует принять плохо обоснованное предположение о напряженности электрического поля в нейтральной плазме. Кроме того, при всей эквивалентности магнитного и электрического поля в специальной теории относительности, она не описывает различия в изоляции от электрического и магнитного полей. На рис. 2 приведена схема магнитной изо-

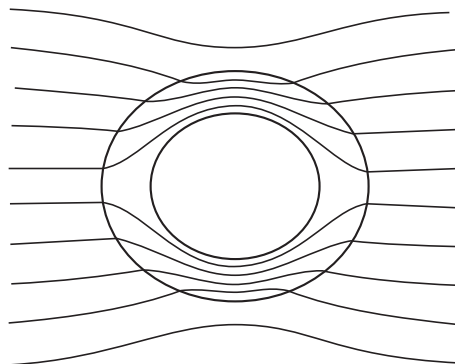


Рис. 2. Схема магнитной изоляции

ляции проводника, взятая из учебника по электродинамике [11]. Представляется, что отсюда следует возможность создания замкнутого контура тока в КТС без взаимодействия с плазмой.

Система уравнений (3), (5) получена в предположении, что ток, проходящий через поперечное сечение троса, в точности равен току, собираемому предшествующим участком троса в плазме. Это предположение эквивалентно предположению, что рассматривается установившийся процесс. Возможность становления такого процесса не обсуждается. Не рассматриваются ни индукционные, ни емкостные свойства ЭДКТС. Вместе с тем собирание ЭДКТС тока в плазме является сложным физическим явлением. Причиной тока в тросе является ЭДС индукции. Заряженные частицы плазмы притягиваются на трос избыточными зарядами троса, величина которых связана с емкостными свойствами троса.

Уравнения (3), (5) для анодной части троса, аналогичные уравнения для катодной части троса (с учетом в уравнении (5) коэффициента перехода ε_1) и граничные условия для тока и (или) потенциала на концах троса составляют модель протекания тока в КТС. Особенностью этой модели является то, что длина анодного и катодного участков троса не фиксирована. Расположение на тросе точки нулевого потенциала B (см. рис. 1), определяющей границы каждого из участков троса, вычисляется в результате решения уравнений.

Анализ решений рассмотренной модели и их свойств рассмотрен в работах [13, 24–26]. Наиболее полное решение уравнений модели,

на наш взгляд, дано в работе [25]. Далее будем следовать изложенному в работе [25] алгоритму решения.

Для решения системы уравнений (3) и (5) удобнее перейти к безразмерным переменным:

$$i = \frac{I}{I^*}, \quad \varphi = \frac{U}{U^*}, \quad \xi = \frac{x}{L^*}, \quad (6)$$

где $I^* = E_m \sigma A_T$ — ток «короткого замыкания», т. е. ток, который собирался бы ЭДКТС при идеальном контакте с плазмой; $U^* = E_m L^*$ — разность потенциалов, $L^* = \frac{(m_e E_m)^{1/3}}{2^{7/3} e} \left(3\pi \frac{\sigma h_T}{n} \right)^{2/3}$ — длина троса; $h_T = \frac{2A_T}{P_T}$ — ширина ленты или радиус троса ЭДКТС.

С учетом (6) уравнения (3) и (5) принимают вид

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = i - 1, \quad (7)$$

$$\frac{di}{d\xi} = \frac{4}{3} \varphi^{1/2}. \quad (8)$$

Для системы (7), (8) легко находится первый интеграл, дающий связь тока и потенциала, который для участков троса можно записать в виде

$$\varphi(i, i_B) = (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \text{ при } \varphi > 0, \quad (9)$$

$$\varphi(i, i_B) = -\frac{1}{\varepsilon_1^{2/3}} (i_B - i)^{2/3} (2 - i_B - i)^{2/3} \text{ при } \varphi < 0, \quad (10)$$

где $\varepsilon_1 = \pi^{-1} \sqrt{m_e / m_i}$ — коэффициент перехода, i_B — безразмерный ток в точке нулевого потенциала B .

Связь между током и длиной троса находится в параметрическом виде:

$$i(v) = 1 - (1 - i_B) \operatorname{ch} v, \quad (11)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} (f(v_0) - f(v)) \text{ при } \varphi > 0, \quad (12)$$

$$\xi(v) = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} \left(f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}} \right) \text{ при } \varphi < 0, \quad (13)$$

где v — параметр, $f(v) = \int_0^v \operatorname{sh}^{1/3} v dv$, $v_0 = \operatorname{arch} \frac{1}{1 - i_B}$ — значение v при $i = 0$.

Выражения (12), (13) получаются из (8) при подстановке (11), (9) и (10). Связь между интервалом изменения v и длиной троса определяет-

ся из уравнения $\xi(v_m) = l_t$:

$$l_t = \frac{4}{3} (1 - i_B)^{1/3} \left(f(v_0) - \frac{f(v)}{\varepsilon^{2/3}} \right), \quad (14)$$

где v_m — значение v при котором $\xi(v_m) = l_t$; $l_t = L / L^*$; L — длина троса КТС.

Выражения (9)—(14) дают решение исходных дифференциальных уравнений и позволяют определить значение напряжения и тока в каждой точке троса при заданных граничных условиях на концах троса. Несмотря на аналитическую форму этих выражений, решить их можно только численным путем. Причем решение рассчитывается для конкретных значений параметров плазмы, магнитного поля и КТС, т. е. при исследовании динамики КТС должно рассчитываться на каждом шаге интегрирования. Поскольку рассматривается установившийся процесс, т. е. предполагается, что скорость его установления гораздо выше остальных скоростей, то скорости изменения параметров не учитываются.

На рис. 3 представлено семейство решений (9) и (10) (фазовый портрет решения уравнений модели). Эти решения позволяют судить о распределении вольтамперных характеристик вдоль троса и принимать предположения [25], позволяющие строить упрощенные решения. Конкретное решение 5 системы определяется граничными условиями, изображенными на рис. 3 линиями 2—3, и приведенной длиной троса l_t . Линией 4 изображена вольтамперная характеристика на катодном конце троса (точке C). Это соотношение между током и напряжением должно выполняться для заданной l_t (выражения (10), (11) для заданной v_m).

Оголенный трос позволяет эффективно собирать электроны с плазмы. Поэтому обычно не предполагается наличие дополнительного устройства для сбора электронов на конце анодной части в точке A . Тогда с большой точностью можно принять, что $i_A = 0$ (линия 1).

Поскольку пассивное собирание ионов весьма ограничено в сравнении с электронами, то для обеспечения эффективного стекания электронов обратно в плазму обычно предполагается, что на отрицательно заряженном конце ЭДКТС устанавливается плазменный контактор (по-

лый катод) [13, 25, 27]. При идеальном контакте с плазмой разность потенциалов между тросом и плазмой в точке C равна нулю (линия 3 на рис. 3). Граничные условия для реального полого катода строятся в предположении, что он обеспечит такой ток, что разность потенциалов между катодом и плазмой будет фиксирована. В зависимости от конкретного устройства катода эта разность потенциалов составляет 15...30 В.

При наличии на катодном конце троса полезной нагрузки граничные условия определяются из следующих соотношений. Закон Ома для отрицательно заряженного участка троса запишем в виде

$$E_m(L - L_B) = U_{cc} + Z_t I_c + \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx, \quad (15)$$

где $E_m(L - L_B)$ — ЭДС, индуцируемая на катодном участке BC , $U_{cc} = 15...30$ В — разность потенциалов между полым катодом и плазмой, Z_t — сопротивление нагрузки; I_c — сила тока, проходящего через точку C , где находится катод;

$\int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx$ — падение напряжения в тросе ЭДКТС при прохождении тока.

Из выражения (3) следует, что разность потенциалов между тросом и плазмой в точке C равна

$$U_c = \int_{L_B}^L \frac{I(x)}{\sigma A_t} dx - E_m(L - L_B). \quad (16)$$

Из (15) и (16) с учетом (6) находится зависимость безразмерного тока i_c от потенциала φ_c на конце ЭДКТС в точке C :

$$i_c = -\frac{\varphi_c}{\omega I_t} - \frac{\phi_{cc}}{\omega}, \quad (17)$$

где $\phi_{cc} = \frac{U_{cc}}{E_m L}$, $\omega = \frac{Z_t \sigma A_t}{L}$ — безразмерные падение напряжения на катоде и сопротивление нагрузки.

На рис. 3 граничное условие (17) выделено штрих-пунктиром (линии 2). При идеальном катодном устройстве (т. е. при $\phi_{cc} = 0$ и $\omega = 0$) линия граничного условия (17) совпадает с осью ou или линией $\varphi_c = 0$ (линии 3). Это значит, что весь трос является анодом, и точка нулевого потенциала точки B совпадает с концом троса (точка C). Такой случай рассматривался в моделях [26, 27].

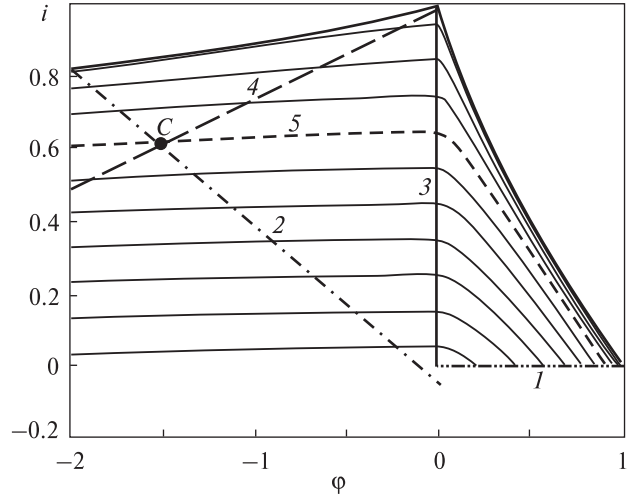


Рис. 3. Фазовый портрет решения уравнений модели [25]: тонкие линии — семейство решений системы (11)—(12), 1 — линия $i_t = 0$, 2, 3 — граничные условия, связанные с наличием контакторов с плазмой на концах ЭДКТС, 4 — граничные условия по длине троса ЭДКТС, 5 — решение системы (11) — (12) для конкретной ЭДКТС

Граничное условие (17) с учетом вольтамперной характеристики катодного конца троса для фиксированной I_t (точка C на рис. 3) дает решение уравнений модели. На рис. 3 данное решение показано штриховой линией (линии 5). Напомним, что I_t содержит в себе параметры взаимодействия ЭДКТС с магнитным полем и плазмой.

Моделирование работы полого катода осуществляется в тех же предположениях, что и моделирование работы всей ЭДКТС: предполагается, что имеет место установившийся процесс, скорость установления которого гораздо выше скоростей изменения внешних параметров. Также предполагается, что излучаемые ЭДКТС электроны никак не изменяют концентрацию плазмы. Предполагается, что электроны уходят от ЭДКТС вдоль линий индукции магнитного поля Земли, и электрический контур замыкается на бесконечности. Обоснованность этих предположений с учетом произвольной ориентации скоростей вылета электронов относительно линий индукции магнитного поля и с учетом собственного магнитного поля ЭДКТС не очевидна, и в работах [13, 19, 25—27] не обсуждается. Не рассматривается и вопрос, что будет с полым катодом, если

напряжение на тросе (в точке *C*) будет ниже уровня, фиксированного для данного катода. Важным с точки зрения динамики является вопрос силовых воздействий полого катода на КТС: не будет ли полый катод создавать крутящий момент? Дело в том, что радиальная КТС имеет одноосную гравитационную стабилизацию и практически никак не может противодействовать крутящему вдоль линии троса моменту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель взаимодействия ЭДКТС с ионосферой и магнитосферой Земли построена на основе ряда не вполне обоснованных предположений. Если учесть, что и модель собирания тока ЭДКТС с ионосферы — модель зондовой теории для орбитально ограниченного тока, требует экспериментального подтверждения, то становится очевидным, что развитие направления ЭДКТС в первую очередь связано с получением достоверных экспериментальных данных функционирования системы в натуральных условиях.

Отметим, что именно резонансная неустойчивость радиальной ЭДКТС заставляет иначе взглянуть на предложенную модель взаимодействия ЭДКТС с магнитосферой и ионосферой Земли. Если бы система была устойчива, то ошибки расчета тока даже в несколько раз не изменили бы пригодности системы для изменения орбит объектов. Однако для реализации проектов радиальной ЭДКТС, в частности проекта увода объектов с орбит, недостаточно получить большой ток, а нужно научиться управлять им.

Эффективность радиальной ЭДКТС во многом будет определяться эффективностью управления стабилизацией ее движения. Несмотря на относительную незначительность моментов, обуславливающих резонансную раскачку пассивной системы, рост амплитуд ее колебаний относительно местной вертикали через определенное время может достигать критической величины, когда растягивающая трос сила становится недостаточной для его распрямления. В этом случае трос начнет сжиматься, образуя петли, увеличится амплитуда колебаний и в итоге ЭДКТС как протяженный проводник перестанет существовать.

Резонансная неустойчивость радиальной КТС является следствием того, что частота ее колебаний перпендикулярно к плоскости орбиты близка к удвоенной орбитальной частоте. Это свойство КТС является принципиальным (характерным) свойством сильно вытянутых в одном измерении структур: осевой момент инерции несравнимо меньше остальных главных центральных моментов инерции системы. Таким образом, получается, что для усиления взаимодействия с полями планеты требуется увеличить протяженность космической системы. Но увеличение протяженности приводит к резонансной неустойчивости системы. Здесь, возможно, работает одна из основных тенденций в динамике систем: стремление систем избежать трения [9, 14], т. е. перераспределения энергии в другие ее формы. Возможно, что любая реализация ЭДКТС потребует активного управления ее движением.

Получение экспериментальных данных функционирования ЭДКТС связано со сложной научно-технической задачей создания экспериментальных систем. Экспериментальная ЭДКТС должна обеспечивать достаточно продолжительный устойчивый режим движения и проведение измерений как в полностью пассивном режиме (без дополнительных контакторов), так и при работе полых катодов. Для этого требуется в рамках известных моделей определить закономерности движения ЭДКТС с учетом взаимного влияния динамических и электродинамических характеристик, а также определить влияния параметров системы и внешней среды на функционирование ЭДКТС. Представляется необходимым и более тщательный анализ моделей взаимодействия ЭДКТС с внешней средой, поскольку «вторичные» факторы, такие как фотоэлектронные токи, могут искажать результаты измерений. Это особенно важно для малых экспериментальных ЭДКТС, для которых ЭДС индукции невелика.

Задачи создания экспериментальных ЭДКТС и проведения натуральных экспериментов представляются очень хорошими для привлечения молодежи к научно-техническому творчеству [1, 8, 27]. Эти задачи обладают необходимыми для этого свойствами:

- большая значимость их решения — они возможно откроют путь к созданию нового эффективного транспортного средства для низких околоземных орбит и позволят там решить проблему космического мусора;

- при кажущейся простоте принципов функционирования ЭДКТС эти задачи предполагают и стимулируют разработку многих нерешенных прикладных и фундаментальных проблем науки;

- междисциплинарный характер задач позволит вполне осознать эффективность коллективного творчества и адаптироваться к его сложности.

1. Алпатов А. П., Гребенкин Ф. Н., Мищенко А. В., Пироженко А. В. Электродинамическая тросовая система увода космических аппаратов с орбит: исследование на наноспутниках // Вісник Дніпропетр. ун-ту. — 2006. — № 2/2. — С. 5—10.
2. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. — М.: Наука, 1990. — 329 с.
3. Бойд Р. Зонды Ленгмюра на космическом корабле // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 506—538.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
5. ГОСТ 25645.146—89. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. — Введ. 21.11.89. — М., 1989. — 825 с.
6. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
7. Маслова А. И., Пироженко А. В. Пространственное движение КА относительно центра масс с учетом переменности аэродинамического момента // Техническая механика. — 2010. — № 3. — С. 51—62.
8. Мищенко А. В., Пироженко А. В., Шувалов В. А. Взаимодействие электродинамической космической тросовой системы с ионосферной плазмой // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту. — 2007. — № 9/2. — С. 190—196.
9. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 160 с.
10. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. — М.: Наука, 1976. — 862 с.
11. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1989. — С. 137—151.
12. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы. — М.: Мир, 1971. — С. 459—505.
13. Ahedo E., Sanmartin J. R. Analysis of bare-tether systems for deorbiting low-earth-orbit satellites // J. Spacecraft and Rockets. — 2002. — 39, N 2. — P. 198—205.
14. Alpatov A. P., Beletsky V. V., Dranovskii V. I., et al. Dynamics of tethered space systems. — Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. — 223 p.
15. Carroll J. A. Space transport development using orbital debris // Final Report on NIAC Phase I. Research Grant N 07600-087. — 2002. — P. 1—43.
16. Estes R. D., Lorenzini E. C., Sanmartin J., et al. Bare tethers for electrodynamic spacecraft propulsion // J. Spacecraft and Rockets. — 2000. — 37. — P. 205—211.
17. Estes R. D., Sanmartin J. R. Cylindrical Langmuir probes beyond the orbital-motion-limited regime // J. Phys. Plasmas. — 2000. — 7, N 10. — P. 4320—4325.
18. Fujii H. A., et al. Sounding rocket experiment of bare electrodynamic tether system // J. Acta Astronautica. — 2009. — 64, N 2—3. — P. 313—324.
19. Hoyt R. P., Barnes I. M., Voronka N. R., Slostad J. T. The Terminator Tape™: A cost-effective de-orbit module for end-of-life disposal of LEO satellites // Space 2009 Conference. — 2009. — AIAA Paper 2009-6733. — P. 1—9.
20. Johnson L., Carroll J., Estes R. D., et al. Electrodynamic tethers for reboost of the international space station and spacecraft propulsion // AIAA Paper 96-4250. — 1996. — 7 p.
21. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions. — San Diego: American Astronautical Soc., 2007. — 453 p.
22. Lorenzini E. C., Cosmo M. L. Tethers in space handbook. — 3rd edition. — Smithsonian Astrophys. Observatory, 1997. — 241 p.
23. McCoy J. E., et al. Plasma motor-generator (PMG) flight experiment results // Fourth International Conference on Tether In Space, Washington, 10—14 April, 1995. — Washington, 1995. — P. 57—85.
24. Samanta Roy R. I., Hastings D. E., Ahedo E. System analysis of electrodynamic tethers // J. Spacecraft and Rockets. — 1992. — 29, N 3. — P. 415—424.
25. Sanjurjo Rivo M. Self balanced bare electrodynamic tethers. Space debris mitigation and other applications: tesis doctoral N 1839. — Madrid, 2009. — 215 с.
26. Sanmartin J. R., Martinez-Sanchez M., Ahedo E. Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tethers // J. Propulsion and Power. — 1993. — 9, N 3. — P. 353—360.
27. Tortora P., Somenzi L., Iess L., Licata R. Small mission design for testing in-orbit an electrodynamic tether deorbiting system // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — 43, N 4. — P. 883—892.

Надійшла до редакції 20.05.11

A. V. Mishchenko, A. V. Pirozhenko

THE ANALYSIS OF INTERACTION MODEL OF ELECTRODYNAMIC TETHER SYSTEMS WITH THE EARTH'S MAGNETOSPHERE AND AN IONOSPHERE

The model of interaction of electrodynamic space tether systems (EDSTS) with the Earth's ionosphere and magnetosphere is analysed. The features of the equation solution of the model and their dependence on boundary conditions on the cable extremities are considered. Some questions relative to the simulation of the influence of additional contactors on current voltage characteristics of the EDSTS are discussed. Some problems of the further examinations are considered.

УДК 523.4-854; 52-72; 52-732; 520-662

**А. В. Дудник¹, П. Подгурский², Я. Сильвестер², С. Гбурек²,
М. Ковалиньский², М. Сялковский², С. Плоценьяк², Я. Бонкала²**

¹Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

²Центр космічних досліджень Польської академії наук, Відділення фізики Сонця, Вроцлав, Польща

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЯСОВ В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА SPHINX И СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕСКОПА ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ СТЭП-Ф: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Частинки високих енергій в земній магнітосфері роблять свій внесок у сигнали, що вимірюються приладами на борту супутника КОРОНАС-ФОТОН, розташованого на низькополярній орбіті. Серед приладів корисного наукового навантаження був сонячний фотометр SphinX для рентгенівського діапазону. Сигнал від частинки виникає завдяки проникненню високоенергійних електронів і вторинних гамма-квантів у матеріали детекторів. Ці сигнали від частинок потребують детального калібрування в абсолютних одиницях. З цією метою були використані вимірювання спеціально розробленого спектрометра частинок СТЭП-Ф. Прилад СТЭП-Ф розташовано у безпосередній близькості до SphinX з полем зору, направленим перпендикулярно до поля зору приладу SphinX. Показано, що детектори приладів СТЭП-Ф і SphinX відтворюють майже ідентичні профілі сигналів під час перетинання супутником областей Бразильської магнітної аномалії і дуже близькі — під час перетину радіаційних поясів Землі. Докладне розуміння цієї відповідності між обома приладами необхідне з огляду на емісію вторинних гамма-квантів, що генеруються від конструкційних матеріалів детекторної головки, обсерваторії ТЕСІС і самого космічного апарата. Динаміка сигналів, породжених високо енергійними електронами і зареєстрованими за допомогою приладу SphinX під час слабкої геомагнітної бурі, відображає процеси радіальної і тітч-кутової дифузії електронів.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость непрерывного изучения вариаций частиц в радиационных поясах Земли и под ними связана не только с воздействием ионизирующего излучения на электронное и иное оборудование космических аппаратов, жизнедеятельность астронавтов на космических станциях. За последние годы накоплено большое количество информации об обусловленности динамики электронов в магнитосфере взаимодействием волн разного типа с частицами высоких энергий. Появились указания на то, что нестационарные потоки частиц высоких энергий под радиационными поясами могут предше-

вать или сопутствовать сейсмической активности Земли [10, 13], что требует более пристального внимания к такому объекту, как магнитосферные частицы высоких энергий. Помимо этого, научные приборы на космических аппаратах, предназначенные подчас для изучения совершенно разных явлений и объектов, могут основываться на однородных или близких по структуре датчиках. Такие датчики могут откликаться не только на интересующий вид излучения, но и на другие, не ожидаемые типы, которые могут служить «помехой» для избранного направления исследований. Так, аппаратура АВС, предназначенная для изучения характеристик потоков жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек и установленная на борту низкоорбитального космического аппарата КОРОНАС-Ф [9], накопила большое количес-

© А. В. ДУДНИК, П. ПОДГУРСКИЙ, Я. СИЛЬВЕСТЕР,
С. ГБУРЕК, М. КОВАЛИНСКИЙ, М. СЯКОВСКИЙ,
С. ПЛОЦЕНЬЯК, Я. БОНКАЛА, 2011

1. Дудник А. В. Вариации потоков электронов в радиационных поясах Земли в мае 2009 года по наблюдениям с помощью прибора «СТЭП-Ф» // Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. фіз. «Ядра, частинки, поля». — 2010. — Вип. 3/47 (№ 916). — С. 56—66.
2. Дудник А. В. Исследование радиационных поясов Земли в мае 2009 года на низкоорбитальном спутнике с помощью прибора СТЭП-Ф // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 5. — С. 12—28.
3. Дудник А. В., Персиков В. К., Боуер Д. и др. Экспериментальные возможности спектрометра-телескопа СТЭП-Ф и первые результаты радиационного картографирования // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН: Тр. раб. сов. — М., 2010. — С. 217—228.
4. Arkhangel'skaja I. V., Amandjolova D. B., Arkhangel'sky A. I., Kotov Yu. D. Features of quasi-stationary precipitations according to the data obtained with the AVS-F instrument onboard the CORONAS-F Satellite // Solar System Res. — 2008. — 42, N 6. — P. 536—542.
5. Dudnik A. V., Persikov V. K., Zalyubovskiy I. I., et al. High-sensitivity STEP-F spectrometer-telescope for high-energy particles of the CORONAS-PHOTON satellite experiment // Solar System Res. — 2011. — 45, N 3. — P. 212—220.
6. Dudnik O. V., Goka T., Matsumoto H., et al. Computer simulation and calibration of the charge particle spectrometer-telescope STEP-F // Adv. Space Res. — 2003. — 32, N 11. — P. 2367—2372.
7. Gburek S., Siarkowski M., Kepa A., et al. Soft X-ray variability over the present minimum of Solar activity as observed by SphinX // Solar System Res. — 2011. — 45, N 2. — P. 182—187.
8. Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M. et al. SphinX soft X-ray spectrophotometer: science objectives, design and performance // Solar System Res. — 2011. — 45, N 3. — P. 189—199.
9. Glyanenko A. S., Kotov Yu. D., Pavlov A. V., et al. The AVS-F experiment on recording rapidly changing fluxes of cosmic and gamma radiation prepared under the CORONAS-F project // Instruments and Experimental Techniques. — 2009. — 42, N 5. — P. 596—603.
10. Huang Jian-Beng, Liu Jing, Ou Yang Xin-Yan, Li Wen-Jing. Analysis to the energetic particles around the m8.8 Chili Earthquake // Seismol. and Geology. — 2010. — 32, N 3. — P. 417—424.
11. Kotov Yu. D. Scientific goals and observational capabilities of the CORONAS-PHOTON solar satellite project // Solar System Res. — 2011. — 45, N 2. — P. 93—96.
12. Kuznetsov S. N., Myagkova I. N., Yushkov B. Yu., et al. Dynamics of the Earth Radiation Belts during Strong Magnetic Storms Based on CORONAS-F Data // Solar System Res. — 2007. — 41, N 4. — P. 338—348.
13. Sgrigna V., Carota L., Conti L. et al. Correlations between Earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2005. — 67, N 15. — P. 1448—1462.
14. Sylwester J., Kuzin S., Kotov Yu. D., et al. A Fast Solar Photometer in X-rays // J. Astrophys. and Astron. — 2008. — 29, N 1-2. — P. 339—343.

Надійшла до редакції 24.05.11

O. V. Dudnik, P. Podgorski, J. Sylwester, S. Gburek, M. Kowalinski, M. Siarkowski, S. Plocieniak, J. Bakala

INVESTIGATION OF ELECTRON BELTS IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE WITH THE HELP OF X-RAY SPECTROPHOTOMETER SPHINX AND SATELLITE TELESCOPE OF ELECTRONS AND PROTONS STEP-F: PRELIMINARY RESULTS

High-energy particles abundant in the Earth's magnetosphere contribute to signals measured by instruments aboard the CORONAS-PHOTON satellite placed in low polar orbit. Among the instruments in the science payload was the Solar Photometer in X-rays (SphinX). Within this instrument, a particle signal originates due to penetration of high-energy electrons and secondary gamma quanta into the detectors. These particle signals need to be absolutely calibrated in detail to perform their analysis. For this, some measurements of the specially elaborated particle spectrometer STEP-F were used. The STEP-F instrument was located in close proximity to the SphinX instrument and its field of view was directed perpendicularly to the SphinX field of view. It is shown that the SphinX and STEP-F detectors provide nearly identical signal profiles during crossing the Brazilian Magnetic Anomaly and substantial correspondence when crossing the Earth's radiation belts. Extended understanding of the correspondence between SphinX and STEP-F are necessary taking into account the secondary gamma ray emission arising from the construction materials of the detector head, the TESIS Observatory and the spacecraft itself. The dynamics of signals caused by high-energy electrons measured by SphinX during a weak geomagnetic storm is found to reflect the processes of radial and pitch-angle diffusion of electrons.

УДК 550.388, 520.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86

И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов¹, С. А. Пазюра¹, С. В. Харитонов¹, Л. Ф. Черногор^{1,2}

¹ Институт ионосферы Национальной академии наук та Министерства освіти і науки України, Харків

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ В ТЕЧЕНИЕ ВЕСЬМА УМЕРЕННОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 20—21 ЯНВАРЯ 2010 г.

Наведено результати аналізу варіацій параметрів геокоосмічної плазми у період вельми помірної магнітної бурі 20—21 січня 2010 р. Магнітна буря супроводжувалася іоносферним збуренням з негативною фазою. Спостереження проведено за допомогою радара некогерентного розсіяння у Харкові. Знайдено кількісні показники збурень.

ВВЕДЕНИЕ

О воздействии геокоосмических бурь на технические, природные и биологические объекты известно давно. То разнообразие глобальных процессов, которое геокоосмическая буря приносит с собой на нашу планету, делает её интересной и актуальной для научного исследования. Сильные вариации магнитного поля Земли во время геокоосмических бурь создают наведенные токи на поверхности Земли, могут вызвать возрастание скорости конвекции плазмы, усиление магнитосферно-ионосферных электрических полей, развитие кольцевого тока и другие процессы. Геомагнитные возмущения сопровождаются возмущениями в верхней атмосфере, ионосфере и электрическом поле атмосферно-ионосферно-магнитосферного происхождения.

В результате геокоосмических бурь могут возникнуть сбои в работе систем навигации и радиосвязи, средств телекоммуникации, мощных энергосистем и др. Многообразие физических и химических процессов в периоды геокоосмических бурь и сложность их взаимодействия затрудняют прогнозирование состояния возмущенной ионосферы. По существу каждая буря является индивидуальной. Классификация бурь проводится по их интенсивности, характеру и величине

не относительных возмущений параметров среды [7, 8, 19 — 21, 25].

Радар в Харькове является единственной установкой некогерентного рассеяния (НР) в среднеширотной Европе, предназначенной для получения параметров ионосферы в невозмущенных и возмущенных условиях. Уже на протяжении трех циклов солнечной активности (СА) на этом радаре проводятся наблюдения состояния ионосферной плазмы и космической погоды [3, 5, 7, 11, 13]. Благодаря своему географическому положению (геомагнитная широта 45.4°, параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$) он исключительно удачно дополняет мировую сеть радаров НР и дает возможность исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глубоко во внутренней плазмосфере, в том числе широтно-долготные эффекты в развитии бури.

Умеренные ионосферные бури возникают значительно чаще, чем сильные, но остаются менее изученными. Сильные ионосферные бури происходят сравнительно редко (как правило, вблизи периода максимальной СА и вскоре после него). Их исследованию уделялось и уделяется основное внимание. Эффекты умеренных ионосферных бурь остаются малоизученными.

Целью работы является сравнительный анализ динамических процессов в ионосфере в течение 20 — 21 января 2010 г. с динамическими

© И. Ф. ДОМНИН, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, С. А. ПАЗЮРА,
С. В. ХАРИТОНОВА, Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2011

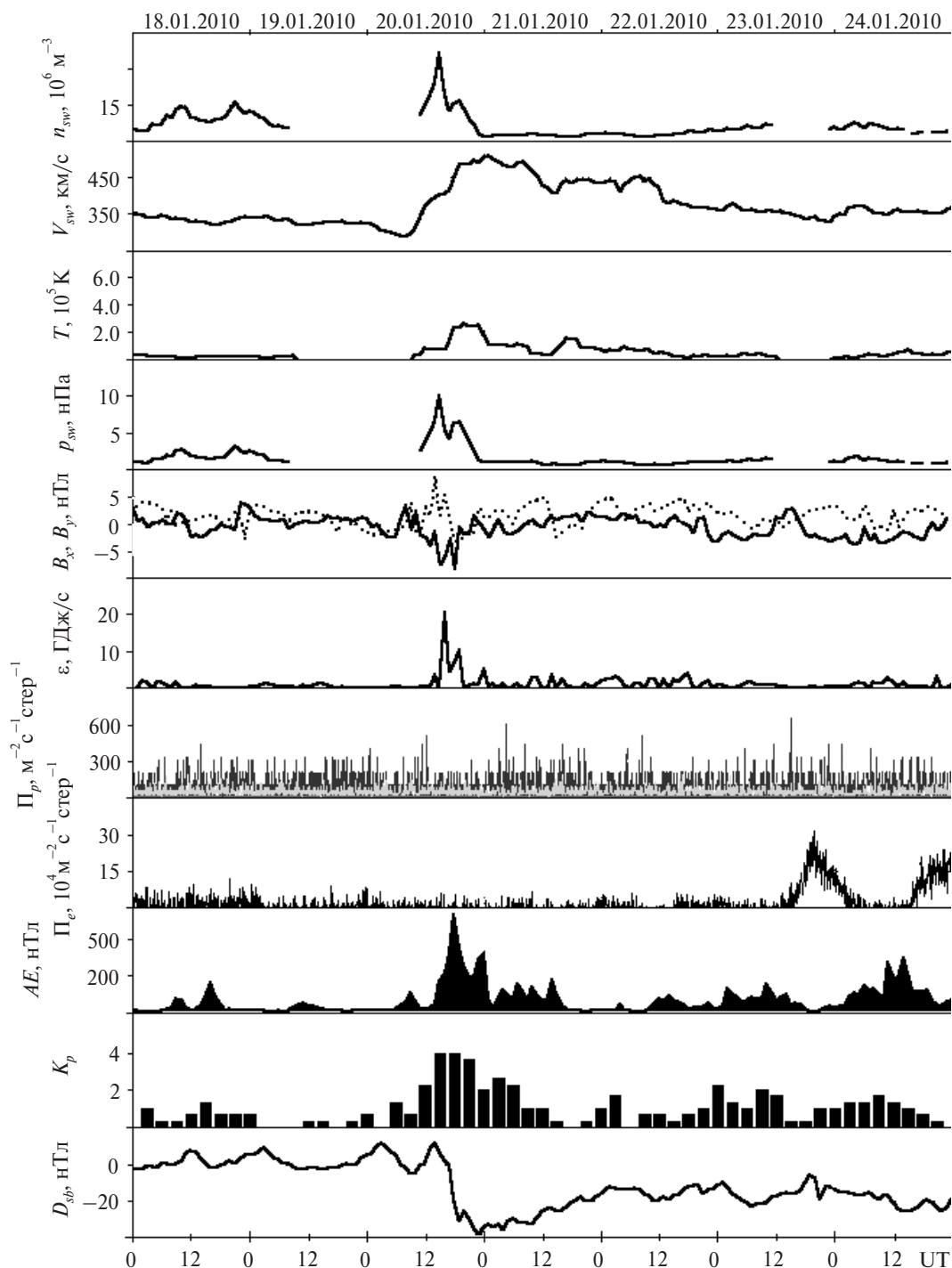


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: радиальной скорости V_{sw} , температуры T и концентрации n_{sw} , рассчитанных значений динамического давления p_{sw} , B_y - (точки) и B_z -компонентов (линия) ММП, рассчитанных значений энергии ϵ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, плотности потоков протонов Π_p и электронов Π_e , AE -индекса (WDC Kyoto), K_p -индекса (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), D_{st} -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) в течение 18 — 24 января 2010 г.

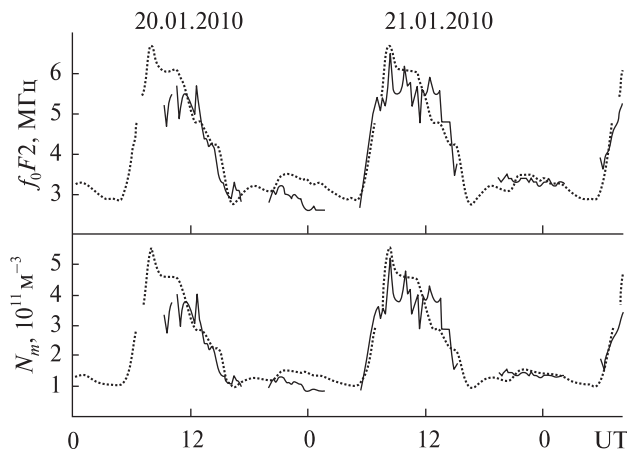


Рис. 2. Вариации критической частоты f_0F2 и концентрации электронов N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 — 21 января 2010 г. (линия) и в контрольный день (точки), полученные при усреднении данных за 13 — 14 декабря 2009 г.

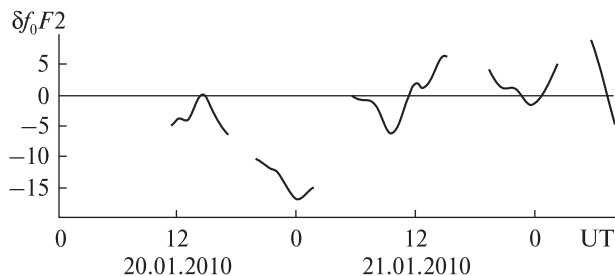


Рис. 3. Временная зависимость относительного отклонения критической частоты δf_0F2 во время ионосферного возмущения 20 — 21 января 2010 г.

процессами, сопровождавшими магнитные бури большой интенсивности. Магнитная буря (МБ) 20—21 января 2010 г. интересна тем, что она имела место вскоре после продолжительного минимума СА.

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Параметры, определяющие состояние космической погоды 20 — 22 января 2010 г., приведены на рис. 1. До 20 января геомагнитное поле было спокойным. Скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с. Примерно в 15:00 (здесь и далее UT) 20 января B_z -составляющая межпланетного магнитного поля (ММП) резко повернула к югу, достигла значения -8.3 нТл, оставаясь

отрицательной до 18:00. В этот период скорость солнечного ветра постепенно увеличивается до 400 км/с, а в 13:00 20 января наблюдается более резкое увеличение V_{sw} до 400 км/с. После этого продолжалось постепенное увеличение скорости до 500 км/с. 20 января зарегистрированы также увеличения температуры T (до $2.7 \cdot 10^5$ К), концентрации n_{sw} (до $36 \cdot 10^6$ м $^{-3}$) солнечного вещества и динамического давления p_{sw} , которое достигло 10 нПа. Значение энергии солнечного ветра, передаваемой магнитосфере Земли в единицу времени (функция Акасофу), было невелико ($\epsilon \approx 10 - 22$ ГДж/с). Результатом этих событий стало возникновение весьма умеренной (по классификации [4]) магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. с экстремальными значениями индексов $AE = 680$ нТл, $D_{st} = -38$ нТл и $K_p = 4$. Буря началась внезапно 20 января около 13:30. Главная фаза продолжалась до 22:30 20 января, а фаза восстановления наблюдалась до конца периода измерений.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Радар некогерентного рассеяния. Наблюдения поведения основных параметров ионосферной плазмы проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния (НР), расположенного в обсерватории Института ионосферы (географические координаты: 49.6° N, 36.3° E, геомагнитные координаты: +45.4°, 117.7°). Подробное описание радара и режимов его работы дано в работах [9, 18].

20 — 22 января 2010 г. радар НР работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 130 и 660 мкс на частотах f_1 и $f_1 \pm 100$ кГц, где $f_1 \approx 158$ МГц. Применение такого режима работы обеспечивает высотное разрешение примерно 20 и 100 км в диапазонах высот $h = 100 \dots 400$ и $h = 200 \dots 1000$ км соответственно.

Ионозонд «Базис». С помощью ионозонда получают ионограммы вертикального зондирования, которые применяются для измерения критической частоты f_0F2 слоя $F2$ ионосферы, калибровки получаемого методом НР профиля электронной концентрации и оперативного анализа состояния космической погоды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариации критической частоты. На рис. 2 изображены временные вариации критической частоты f_0F2 и электронной концентрации N_mF2 в максимуме слоя $F2$ в течение 20 — 21 января 2010 г., которые получены из ионограмм через 15-мин интервалы. Значения для контрольного дня были получены при усреднении данных в магнитоспокойные сутки 13 — 14 декабря 2009 г. Кривая для контрольного дня построена скользящим усреднением на интервале 45 мин с шагом в 15 мин. Для 20 — 22 января график критических частот сглажен на интервале 45 мин с шагом в 15 мин.

20 января, когда началась магнитная буря, зарегистрировано уменьшение концентрации электронов N_mF2 до 30 %, а во время отрицательной фазы слабого возмущения значения N_mF2 уменьшились примерно на 34 %. 21 января уже наблюдается восстановление концентрации электронов, и уменьшение составило до 1.1 — 1.2 раз (см. рис. 2).

Относительное отклонение критической частоты рассчитано по формуле:

$$\delta f_0F2 = \frac{f_0F2 - f_0^0F2}{f_0^0F2} \cdot 100\%,$$

где f_0F2 — критическая частота в максимуме слоя $F2$ во время магнитной бури, а f_0^0F2 — в спокойный день. Временная зависимость относительного отклонения критической частоты во время ионосферного возмущения 20 — 21 января изображена на рис. 3. Изменения δf_0F2 были рассчитаны с применением скользящего усреднения отклонения критической частоты на интервале 315 мин с шагом в 15 мин. Из рис. 3 видно, что в ночь с 20 на 21 января наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

Вариации концентрации электронов. Концентрация электронов N_e в максимуме области $F2$ в дневное время, как известно, определяется тремя основными процессами: ионизацией, рекомбинацией и переносом плазмы (за счет амбиполярной диффузии, термосферного ветра и дрейфа в

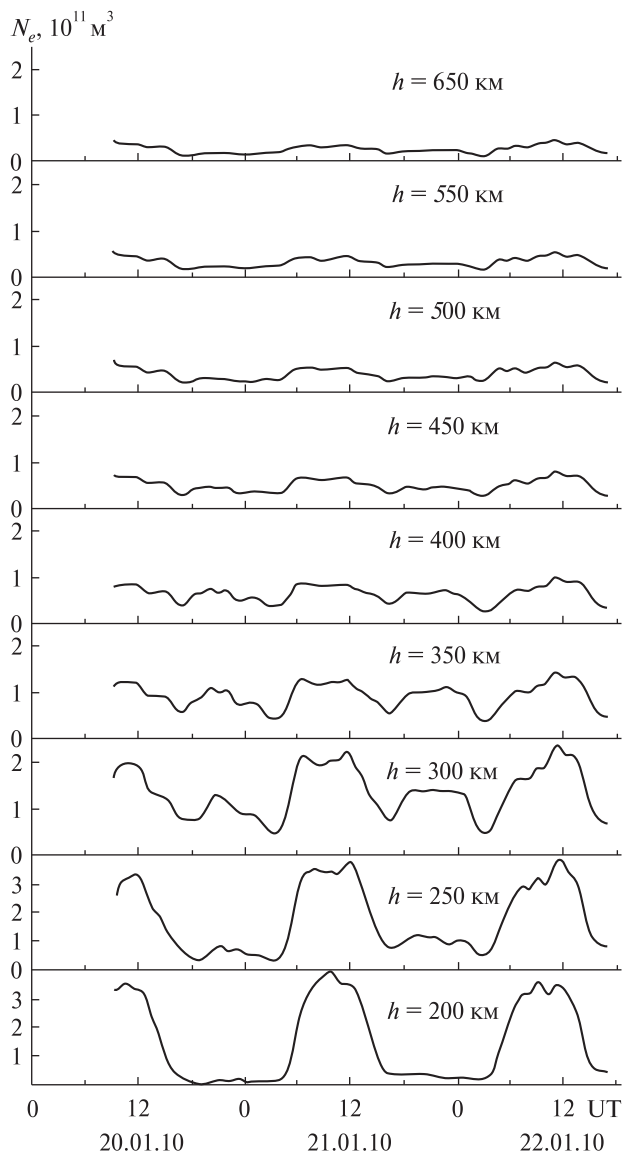


Рис. 4. Временные вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах

скрещенных электрическом и геомагнитном полях), а в ночное время N_e поддерживается за счет нисходящего потока плазмы из протоносферы.

Временные вариации концентрации электронов, измеренные радаром НР в диапазоне высот $h = 200 \dots 600$ км, представлены на рис. 4. Во время ионосферного возмущения, в ночь с 20 на 21 января, на высотах 200 — 250 км (где находился в этот период максимум слоя $F2$) уменьшение N_e составило 32 — 37 %. А 21 января уже нача-

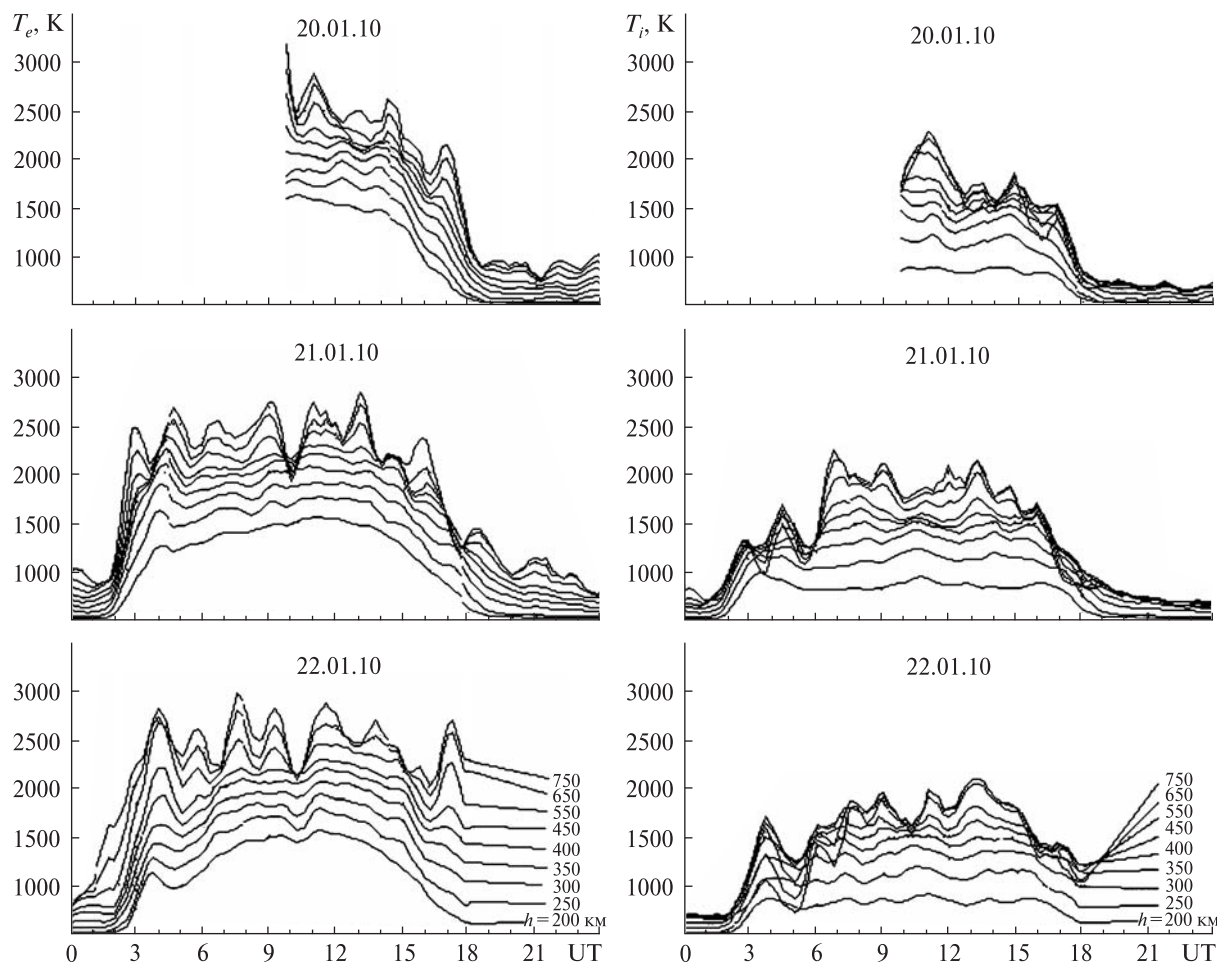


Рис. 5. Вариации температур электронов T_e (слева) и ионов T_i (справа) в период с 20 по 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

лось постепенное восстановление, которое продолжалось до конца измерений.

Вариации температуры электронов и ионов. В минимуме СА в спокойной ионосфере изменения температуры электронов T_e характеризуются быстрым увеличением во время восхода Солнца, уменьшением T_e около полудня (за счет увеличения скорости передачи тепла от электронов к ионам, которая пропорциональна N_e^2) и снижением T_e после захода Солнца. В целом температуры электронов и ионов испытывают значительные суточные и сезонные вариации в период минимума солнечной активности [14].

На рис. 5 представлены временные вариации температур электронов и ионов с 20 по 22 янва-

ря 2010 г. Во время возмущения в ночь с 20 на 21 января наблюдалось увеличение температуры электронов по сравнению с последующей ночью. На высоте 200 км T_e увеличилась всего лишь на несколько градусов, а на $h = 750$ км — до 200 К. Около полудня 20 января на высоте 200 км температура электронов составила 1650 К, а 21 и 22 колебалась около 1500 К. Видно, что T_e претерпевала значительные суточные вариации, но характерный локальный минимум около полудня был достаточно хорошо выражен [14].

Во время возмущения температура ионов T_i изменялась незначительно. Максимальное увеличение до 50 К зафиксировано на высоте 750 км. T_i увеличивалась с восходом Солнца, в дневные

часы достигла максимальных значений и после захода Солнца уменьшилась. В околополуденные часы ионосферные возмущения слабо повлияли на нагрев ионов.

Из рис. 4 и 5 видно, что в течение отрицательного ионосферного возмущения (ночью с 20 на 21 января) уменьшение концентрации электронов N_e сопровождалось увеличением температуры электронов T_e и ионов T_i . Такой необычный нагрев плазмы в средних широтах – редкое явление.

Вариации скорости движения ионосферной плазмы. На рис. 6 представлены временные вариации вертикальной составляющей скорости ионосферной плазмы V_z для ряда высот ионосферы в период с 20 по 22 января 2010 г. Видно, что на этих высотах движение плазмы было в основном нисходящим ($V_z < 0$) в течение всего периода измерений. Во время ионосферного возмущения 20 и 21 января наблюдались флуктуации скорости V_z . Первое отклонение скорости в сторону увеличения ее абсолютного значения имело место приблизительно с 15:00 до 17:30 – 18:00 на высоте 308 км и выше. Например, на высоте 308 км значение V_z изменилось с -61 м/с в 15:00 до -69 м/с в 16:00, а затем восстановилось в 17:15 до ожидаемого в это время в отсутствие возмущения значения -50 м/с. Начало отклонения близко к моменту поворота B_z -составляющей межпланетного магнитного поля к югу. Можно предположить, что есть корреляция вариаций V_z и B_z -компонента межпланетного магнитного поля. Отметим, однако, что для зимней ионосферы приблизительно в это же время обычно начинает проявляться вечерний экстремум скорости (увеличение модуля отрицательных значений V_z).

Уменьшение модуля скорости нисходящего движения плазмы, а затем его восстановление наблюдалось на всех высотах с 21:00 до 23:00. С увеличением высоты эффект проявлялся отчетливее.

Наибольший эффект имел место при переходе от ночного к утреннему времени. На фоне обычного утреннего изменения V_z (приблизительно с 01:30 до 08:00 с экстремумом около 06:00) наблюдалось заметное увеличение абсолютной ве-

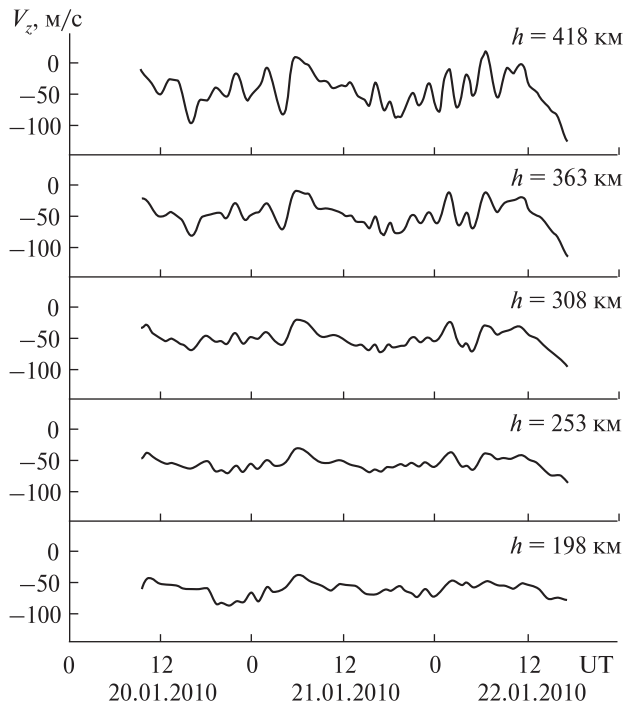


Рис. 6. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z на фиксированных высотах в период 20 – 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

личины скорости нисходящего движения плазмы с 01:45 до 03:45, а затем ее уменьшение до достижения приблизительно в 06:00 характерных для данного времени значений скорости от -40 до $+11$ м/с для $h = 198 \dots 418$ км (см. рис. 6). Наблюдаемое изменение скорости симметрично относительно экстремума ее отклонения, величина которого увеличивается с высотой (если на высоте 198 км амплитуда колебания V_z составляла 18 м/с, то на высоте 418 км она достигла величины 82 м/с). На малых высотах максимальное по модулю отклонение V_z возникало раньше, чем на больших: для высот 253 км и 418 км отличие во времени составляет 30 мин. Подобное, но уже менее выраженное отклонение наблюдалось и утром 22 января приблизительно в такое же время. В дневное время 20, 21 и 22 января флуктуации V_z незначительны, а поведение скорости характерно для зимней дневной среднеширотной ионосферы [15, 16].

В табл. 1 приведены значения скорости V_z и вычисленные значения плотности потока плазмы $\Pi = V_z \cdot N_e$ для высоты 300 км в характерные моменты времени: в 12:00 до возмущения (20 января) и на разных этапах фазы восстановления (21 и 22 января), в 20:00 20 января во время главной фазы бури и в такое же время 21 января на фазе восстановления, а также в 00:00 21 января при максимальном по модулю значении отклонения критической частоты $\delta f_0 F2 \approx -17\%$ (см. рис. 3) и в 00:00 22 января при $\delta f_0 F2 \approx -2\%$. Из табл. 1 видно, что вблизи полудня отличия скорости незначительны, величина плотности потока ионов в первые сутки фазы восстановления изменилась всего на 17%, а во вторые сутки достигла уровня, который был до наступления бури. В ночное время отличия скорости были также незначительны, при этом абсолютная величина скорости плазмы во время главной фазы и в начале фазы восстановления на 6–7 м/с меньше модуля V_z в последующие сутки (ближе к концу фазы восстановления). Плотность потока ионов при этом отличалась на 45% для 20:00 и на 74% для 00:00 в основном за счет отличия значений концентрации электронов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подвод энергии к электронам. Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \leq 350$ км) из-за малости длины свободного пробега носит локальный характер. Выше 200 км основными механизмами охлаждения электронного газа являются

кулоновские соударения с ионами, а также возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [1, 33]. Уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае для диапазона высот 200–350 км в системе СИ имеет вид [24, 25]

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N N(O) (T_e - T_n) T_n^{-1},$$

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода, $N(O)$ — концентрация этих атомов.

Результаты расчетов энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, и составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e представлены на рис. 7. При расчетах использовались значения температур электронов T_e и ионов T_i , концентрации электронов N_e , полученные методом НР. Температура нейтралов T_n и концентрация атомов кислорода $N(O)$ взяты из модели NRLMSIS-00 [28].

Вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был разным для каждого дня (см. рис. 7). 21 января, когда уже закончилась главная фаза МБ и началась фаза восстановления, вблизи местного полудня наблюдалось небольшое уменьшение (до 1.2 раз)

Таблица 1. Значения вертикальной составляющей скорости V_z и плотности потока Π плазмы на высоте 300 км в характерные моменты времени 20–21 января 2010 г.

| UT | 12:00 | | | 20:00 | | 0:00 | |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|---|--|
| Дата, январь 2010 | 20 | 21 | 22 | 20 | 21 | 21 | 22 |
| Фаза бури и условия | Спокойное состояние | Фаза восстановления | Фаза восстановления | Главная фаза | Фаза восстановления | Фаза восстановления $\delta f_0 F2 \approx -17\%$ | Фаза восстановления $\delta f_0 F2 \approx -2\%$ |
| V_z , м/с | –49 | –50 | –41 | –54 | –60 | –47 | –54 |
| N_e , 10^{11} м^{-3} | 1.92 | 2.21 | 2.33 | 1.08 | 1.40 | 0.88 | 1.36 |
| Π , $10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ | –9.4 | –11.0 | –9.6 | –5.8 | –8.4 | –4.2 | –7.3 |

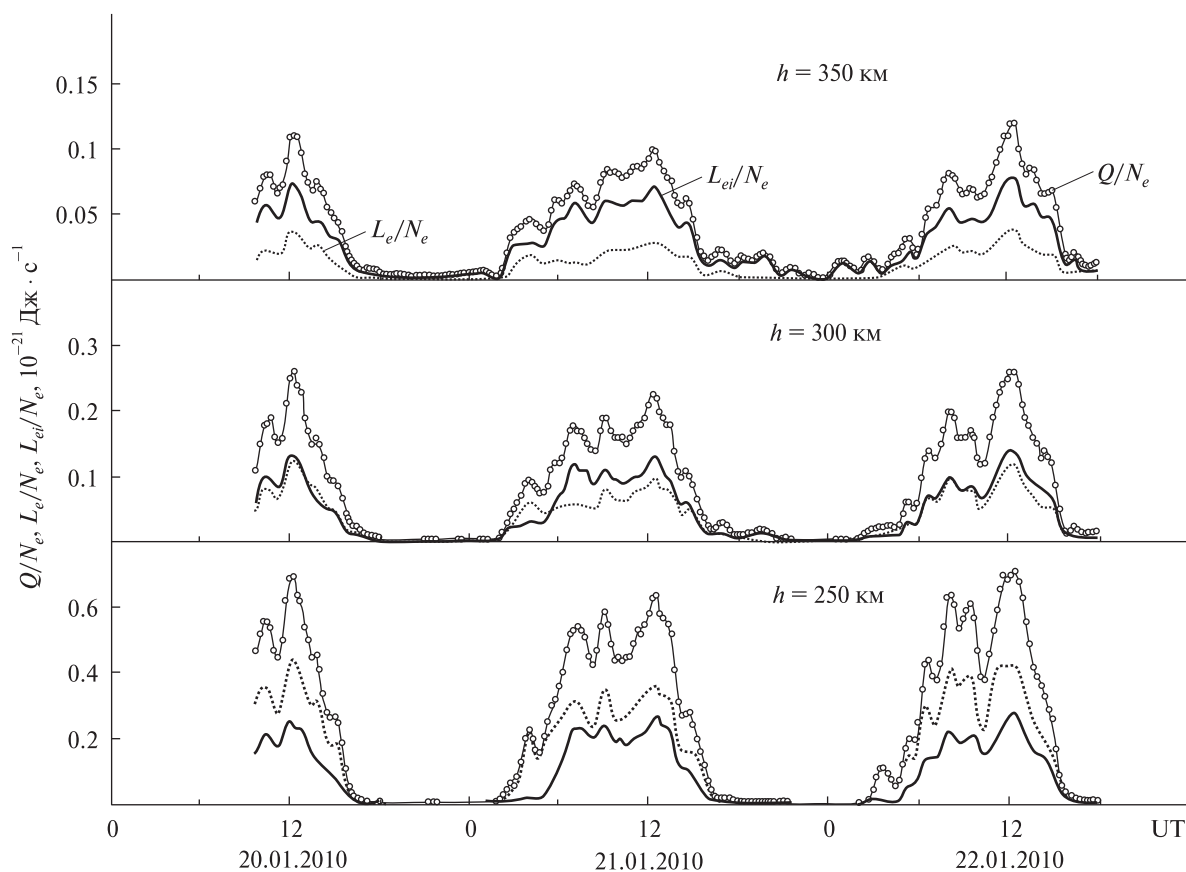


Рис. 7. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа (Q/N_e) и теплообмена электронов с ионами (L_{ei}/N_e) и атомами кислорода (L_e/N_e) в период 20 — 22 января 2010 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами. В результате этого подвод энергии к электронному газу Q/N_e тоже немного уменьшился, что характерно для всего диапазона высот в этот день. Тогда же в дневное время на высоте $h = 250$ км превышение составляющей L_e/N_e над L_{ei}/N_e уменьшилось по сравнению с предыдущим и последующим днями. Вообще такое преобладание происходит за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e , что характерно для условий невысокой СА. В это же время на высоте $h = 300$ км составляющие потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e стали преобладать над составляющими потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с нейтралами L_e/N_e , хотя 20 и 22 января вклад

этих двух механизмов был практически равен за счет падения с высотой концентрации атомов кислорода $N(O)$ и увеличения L_{ei}/N_e . На высоте $h = 350$ км составляющая L_{ei}/N_e явно преобладает над составляющей L_e/N_e , только для 21 января все параметры немного меньше, чем в остальные дни.

Концентрация нейтралов. Нейтральная атмосфера оказывает влияние на поведение ионосферной плазмы как в спокойных, так и в возмущенных условиях. На рис. 8 приведены вариации концентраций $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ основных компонентов нейтральной атмосферы — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода — на высоте 300 км в течение 20 — 22 января 2010 г. соответственно. Для расчета нейтрального состава использовалась термо-

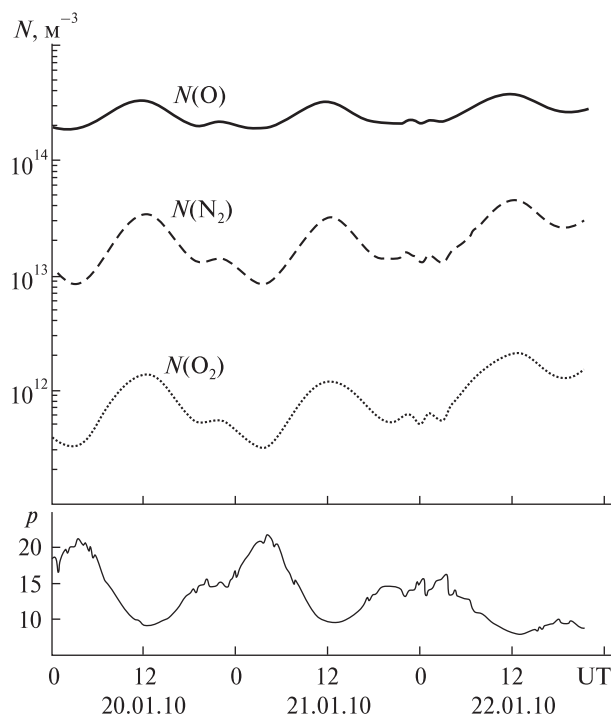


Рис. 8. Временные вариации концентрации азота, кислорода (см. текст) нейтральной атмосферы и параметра $p = N(\text{O})/(N(\text{N}_2) + N(\text{O}_2))$ на высоте 300 км в период 20 – 22 января 2010 г. (из расчета по модели NRLMSISE-00)

сферная модель NRLMSIS-00 [28]. Процессы, которые происходят в ионосфере (перенос плазмы, фотоионизация, изменение электронной концентрации), зависят и определяются именно составом нейтральной атмосферы.

На рис. 8 также приведены временные вариации параметра $p = N(\text{O})/(N(\text{N}_2) + N(\text{O}_2))$. Этот параметр характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов O^+ и пропорционален концентрации электронов в области F ионосферы.

20 января, когда началась ионосферная буря, концентрации $N(\text{O}_2)$, $N(\text{N}_2)$ и $N(\text{O})$ не изменялись. Но во время отрицательного возмущения (в минимуме провала) отмечалось уменьшение концентрации молекулярного азота и кислорода всего лишь на 13 и 11 % соответственно. Результатом этих событий стало увеличение параметра p на 7 %. Концентрация атомарного кислорода на протяжении этого периода изменилась очень слабо.

Значения параметра $p_1 = N(\text{O})/N(\text{N}_2)$ по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED для широты города Харькова составляли $p_1 = 0.48, 0.55$ для 20 и 21 января 2010 г. Параметр p_1 20 января уменьшился примерно на 13 %.

На примере данного возмущения, сравнивая данные, полученные при помощи прибора GUVI TIMED и из модели NRLMSISE-00, видно, что модель NRLMSISE-00 не полностью соответствует не только конкретным геофизическим условиям, но и географическому положению харьковского радара НР. Поэтому данные этой модели (нейтральный состав атмосферы) необходимо корректировать не только во время магнитных бурь, но и в слабо возмущённых условиях, и даже в магнитоспокойных условиях. Такой же вывод сделан и в работах [17, 30].

Температура нейтрального газа. Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, сопровождающий магнитную бурю. Температура нейтралов T_n вычислялась на основе уравнения теплового баланса ионного газа [1, 22, 33] по методике [31, 32]. Для расчета T_n использовались ионосферные параметры, измеренные методом НР. Временные вариации T_n в период с 20 по 22 января 2010 г. на высотах $h = 250 \dots 450$ км представлены на рис. 9. Здесь же для сравнения приведены данные $T_{n\text{MSIS}}$, рассчитанные по модели NRLMSISE-00, а также T_i .

Анализ результатов расчета T_n показал, что в данном цикле измерений высота термопаузы (где атмосфера становится изотермичной) составила около 300 км. Выявлено, что как и во время отрицательной фазы возмущения, так и после нее значения дневных и ночных температур нейтралов оставались практически одинаковыми. Можно утверждать, что слабое отрицательное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа. Подтверждено, что модель NRLMSISE-00 в дневное время дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная буря, проходившая с 20 на 21 января 2010 г., была весьма умеренной. Над Харьковом

она сопровождалась слабым ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Как известно, слабые возмущения мало изучены, и поэтому требуют дальнейшего детального рассмотрения и сравнения с более сильными МБ и ионосферными возмущениями.

Проведем сравнительный анализ динамических процессов в ионосфере для весьма умеренной МБ и сильнейших геомагнитных бурь 25 сентября 1998 г., 30 — 31 мая 2003 г. и 7 — 10 ноября 2004 г., описанных подробно в работах [2, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 24, 26, 27].

Магнитная буря 25 сентября 1998 г. Причиной, вызвавшей сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г., послужила межпланетная ударная волна, связанная со вспышкой на Солнце класса М6/3В 23 сентября 1998 г. [9, 24, 26, 27]. После прихода ударной волны составляющая межпланетного магнитного поля B_z резко повернула к югу и достигла минимального значения -18 нТл. Параметры солнечного ветра (температура, радиальная скорость, динамическое давление и энергия, передаваемая магнитосфере) тоже изменились. Во время главной фазы индекс D_{st} уменьшился до -202 нТл, а максимальное значение индекса K_p составило $8+$. Ионосферная буря носила отрицательный характер. Отрицательное ионосферное возмущение в ночное время, скорее всего, было вызвано смещением к экватору главного ионосферного провала [9]. Обнаружено уменьшение $N_m F_2$ во время главной фазы бури в максимуме области F_2 до $3 - 3.5$ раз.

Буря 25 сентября 1998 г. сопровождалась сильными эффектами в ионосфере. Обнаружен дополнительный нагрев ионосферной плазмы около 02:00 на высоте 500 км: T_e составляла около 840 К, а $T_i - 500$ К. Дополнительный нагрев обусловлен усилением ионосферных токов за счет проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты, высыпания энергичных частиц и фрикционного нагрева в результате ион-нейтрального трения. В целом температура электронов T_e увеличилась на $100 \dots 500$ К, а ионов — $100 \dots 150$ К. Выявлено увеличение температуры нейтральной атмосферы T_n во время бури до 360 К на высоте $h = 300$ км, который объясняется как высокоширотным нагре-

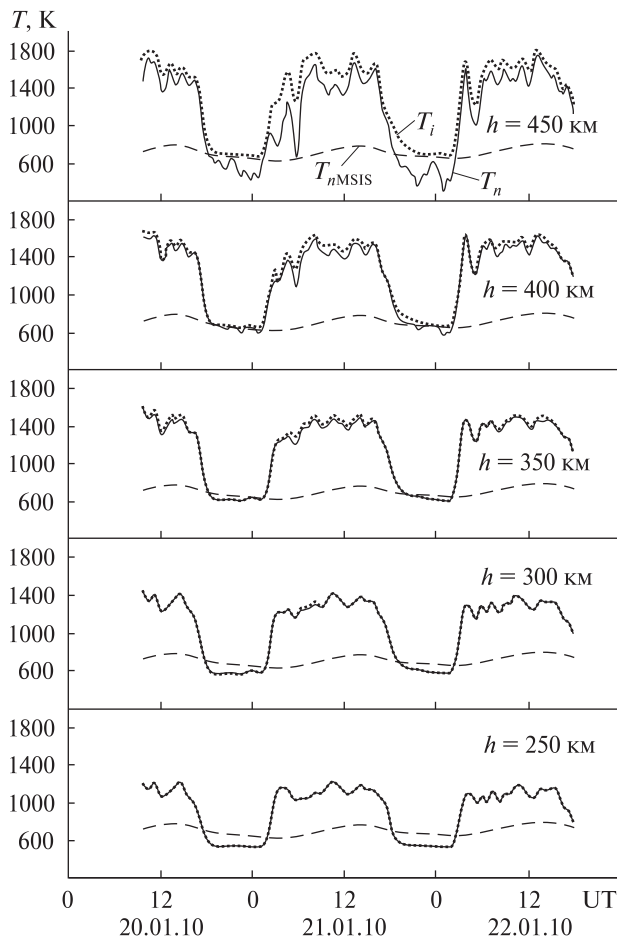


Рис. 9. Временные вариации измеренных температур ионов T_i (точки) и рассчитанных температур нейтралов T_n по данным радара HP (сплошные линии), а также T_{nMSIS} по модели NRLMSISE-00 (пунктир) в период с 20 по 22 января 2010 г.

вом термосферы и переносом тепла из высоких широт в средние широты за счет усиления направленного к экватору меридионального ветра, так и локальным джоулевым нагревом в результате проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [9, 24].

Магнитная буря 29 — 30 мая 2003 г. С 29 на 30 мая 2003 г. в результате высокой вспышечной активности на Солнце произошла сильнейшая магнитная буря ($K_p = 8+$) [2, 12]. Главная фаза бури протекала с 23:00 29 мая до 03:00 30 мая с минимальным значением индекса $D_{st} = -131$ нТл и B_z -компонента, равного -15 нТл. Затем составляющая B_z повернула на север, и началась фаза

восстановления ($B_{\text{зmax}} = 20$ нТл 30 мая). Индексы A_p с 29 по 31 мая равнялись 89, 49 и 17 соответственно.

Магнитная буря сопровождалась интенсивной отрицательной ионосферной бурей. В течение главной фазы МБ концентрация электронов N_m уменьшилась до 4 раз, при этом уменьшение N_m сопровождалось сильным нагревом плазмы. На высотах 320 — 770 км температура электронов T_e превысила 2200 — 3300 К, а ионов T_i — 1200 — 2400 К.

30 мая 2003 г. отмечено необычное явление вблизи восхода Солнца. С 02:00 до 03:15 критическая частота f_0F2 увеличилась с 3.0 до 3.8 МГц, а затем на протяжении часа она неожиданно начала уменьшаться до 3.4 МГц, потом снова увеличилась. Внезапный провал f_0F2 произошел при снижении слоя $F2$ ионосферы из-за резкого скачка высоты максимума слоя $F2$ вниз, а затем вверх [12].

Магнитная буря 7 — 10 ноября 2004 г. Сильнейшая геокоsmическая буря 7 — 10 ноября 2004 г. представляла собой последовательное наложение двух сильнейших магнитных возмущений 7 — 8 и 9 — 10 ноября [3, 6, 13, 25]. Эти возмущения были вызваны высокой активностью Солнца, которая связана с быстрым развитием на его диске активной области 696. С приходом ударных волн максимальное отклонение B_z -компонента ММП составляло -42 нТл и -25 нТл в периоды возмущений 7 — 8 ноября и 9 — 10 ноября соответственно. Максимальное значение K_p индекса для этих периодов было одинаково и достигло 9—. Индекс D_{st} при этом достигал значений -373 и -289 нТл соответственно, а индекс A_p — 198 и 181. Скорость солнечного ветра увеличилась с 310 до 700 км/с 7 ноября и с 675 до 825 км/с 9 ноября.

В период геокоsmической бури 7 — 10 ноября 2004 г. были обнаружены эффекты сильного отрицательного ионосферного возмущения. Во время главной фазы бури 8 ноября отмечено уменьшение $N_m F2$ в 6—7 раз, а 10 ноября — в 4 раза.

Сильнейшая геокоsmическая буря 7 — 10 ноября 2004 г. также вызвала ряд интересных эффектов [3, 6, 13, 25]. Ночной нагрев плазмы в этот период достигал дневных значений температур $T_i = 1300 \dots 2000$ К и $T_e = 1600 \dots 3000$ К на высотах $h =$

$= 250 \dots 750$ км. Зарегистрировано увеличение T_e на 500...1100 К 8 ноября и на 250... 800 К 10 ноября и T_i на 100... 350 К и 50... 250 К соответственно. Над Харьковом при $D_{st} = -289$ нТл днем наблюдались когерентные отражения сигналов радара на расстоянии 700... 1000 км и ионограммы вертикального зондирования с диффузным рассеянием. Такие эффекты косвенно свидетельствовали о кратковременном смещении экваториальной границы аврорального овала на широту, достаточно близкую к Харькову.

Данные геокоsmические бури иллюстрируют тесную взаимосвязь явлений на Солнце, в ближнем космосе, ионосфере и термосфере. Они вызвали существенные возмущения в среднеширотной ионосфере и атмосфере, а также ряд необычных для средних широт явлений.

Магнитные бури 1998, 2003 и 2004 гг. по категории классификации одинаковы, но отличаются друг от друга своей интенсивностью. Для сравнения четырех рассматриваемых бурь в табл. 2 представлены значения основных параметров, описывающих коsmическую погоду (минимальное значение B_z -компонента, максимальная величина функции Акасофу ϵ и индексов AE , K_p , минимальное значение индекса D_{st}), вертикальная скорость переноса плазмы V_z в день начала возмущения в 12:00 на высоте $h_z = 300$ км, плотность потока плазмы Π ($h = 300$ км в 12:00), плотность потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу ($h = 300$ км в 12:00), и относительные изменения концентрации электронов $N_m F2 / (N_m F2)_0$, температуры электронов T_e / T_{e0} и ионов T_i / T_{i0} для трех рассматриваемых бурь. Сравнение температур ионов и электронов проводилось для диапазона высот 200 — 750 км.

Магнитная буря 20 — 21 января 2010 г. сопровождалась ионосферным возмущением с отрицательной фазой. Уменьшение концентрации электронов $N_m F2$ в максимуме слоя $F2$ до 34 % могло быть вызвано рядом факторов, основным из которых является возмущение нейтрального состава [28, 29]. Другие случаи развития отрицательных возмущений различной интенсивности подробно рассмотрены в работе [23]. Температура электронов во время бури до высоты 450 км

увеличилась лишь незначительно, а выше — на 50 ... 200 К. Температура ионов немного увеличилась, только на высоте $h = 750$ км она увеличилась на 50 К. На поведение температуры нейтрального газа слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло.

Данная весьма умеренная буря в целом качественно не повлияла на суточные вариации скорости V_z . Как обычно, наблюдался утренний экстремум (уменьшение модуля скорости нисходящей плазмы на высотах до 380 км и в сторону увеличения положительных значений V_z на больших высотах), обусловленный процессами амбиполярной диффузии и переноса плазмы нейтральным ветром в условиях усиления процессов фотоионизации по сравнению с процессом потерь ионов O^+ и изменения направления движения меридионального компонента термосферного ветра. Как и в условиях невозмущенной ионосферы, имели место повышенные (на 10 — 15 м/с) значения нисходящей скорости плазмы (около -50 м/с днем) по сравнению с летними значениями. Наблюдалась также и необычные

отдельные отклонения скорости в сторону отрицательных значений V_z во время главной фазы бури вечером (с 15:00 до 17:30 — 18:00 в зависимости от высоты) и в начале фазы восстановления при переходе от ночи к утру (с 01:45 до 05:45) с амплитудой, увеличивающейся с увеличением высоты. Вызванные бурей вариации плотности потока плазмы определялись в значительной степени вариациями концентрации электронов и составляли 15 — 80 %.

Из табл. 2 видно, что параметры, описывающие космическую погоду в течение весьма умеренной магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. и сильнейших бурь 1998, 2003 и 2004 гг. значительно отличаются. Во время весьма умеренной МБ максимальное значение K_p -индекса достигало 4, D_{st} отклонилось только до -38 нТл, а B_z — до -8.3 нТл. Уменьшение концентрации электронов в максимуме области F2 было незначительным (всего лишь в 1.6–1.7 раза) по сравнению с сильнейшими бурями (уменьшение в 3 — 7 раз). T_e увеличилась не более чем на несколько сот кельвин, тогда как при сильных МБ — до 1000 К

Таблица 2. Значения основных параметров магнитных и ионосферных бурь 20 — 21 января 2010 г., 25 сентября 1998 г., 29 — 30 мая 2003 г. и 7 — 10 ноября 2004 г.

| Параметры | Весьма умеренная геомагнитная буря 20 — 21 января 2010 г. | Сильнейшая геомагнитная буря 25 сентября 1998 г. | Сильнейшая геомагнитная буря 29 — 30 мая 2003 г. | Сильнейшая геомагнитная буря 7 — 10 ноября 2004 г. | |
|--|---|--|--|--|-----------------------------|
| | | | | Возмущение с 7 на 8 ноября | Возмущение с 9 на 10 ноября |
| $B_{z\min}$, нТл | -8.3 | -18 | -15 | -45 | -25 |
| ϵ_{\max} , ГДж/с | 22 | 100 | 75 | 450 | 150 |
| AE_{\max} , нТл | 680 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| $K_{p\max}$ | 4 | 8+ | 8+ | 9- | 9- |
| $D_{s\min}$, нТл | -38 | -202 | -131 | -373 | -289 |
| $N_m F2 / (N_m F2)_0$ | 0.66 | 0.3 | 0.3 | 0.1 — 0.2 | 0.3 |
| $\Delta T_e = T_e - T_{e0}$, К | 3 — 210 | 250–500 | 250 — 1100 | 15 — 1100 | 250 — 800 |
| T_e / T_{e0} | 1 — 1.3 | 1.1 — 1.2 | 1.3 — 2.7 | 1 — 1.6 | 1 — 1.4 |
| $\Delta T_i = T_i - T_{i0}$, К | 3 — 50 | 100 — 150 | 15 — 900 | 150–300 | 150 — 250 |
| T_i / T_{i0} | 1 — 1.1 | 1.1 — 1.2 | 1 — 1.8 | 1 — 1.4 | 1 — 1.3 |
| V_z , м/с (12:00, $h = 300$ км) | -50 | -25 | -40 | Не измерялась | |
| Π , 10^{12} м ⁻² ·с ⁻¹ (12:00, $h = 300$ км) | -11.0 | -17.8 | -16.0 | Не вычислялась | |
| Π_T , 10^{-5} Вт/м ² (12:00, $h = 300$ км) | -0.2 | -1.25 | -0.75 | -0.5 | -1.15 |

и более. T_i вообще увеличилась лишь до 50 К, а в других случаях изменение температуры ионов составляет 900 К.

Сравнение вариаций скорости V_z в рассматриваемый период с данными, полученными в другие периоды возмущений, показало ряд особенностей. Результаты измерений скорости 20 — 22 января 2010 г. кардинально отличаются от данных, полученных во время крайне сильной магнитной бури 24 — 25 сентября 1998 г. (индекс $A_p = 28$ и 121 соответственно) [4, 11]. Во время бури 1998 г. положительные значения V_z значительно увеличились, достигнув на высоте 300 км значения +10 м/с около 19:00 24 сентября и +55 м/с около 3:00 25 сентября. Магнитной буре сопутствовало изменение процесса ионосферно-плазмосферного взаимодействия. На высотах 200—500 км в возмущенный день вертикальная составляющая скорости движения плазмы $V_z \approx 20 \dots 60$ м/с, плотность потока плазмы $\Pi \approx (1 \dots 5) \cdot 10^{10}$ м⁻²с⁻¹, в то время как в невозмущенный день $V_z \approx -10 \dots -40$ м/с, $\Pi \approx -(5 \dots 8) \times 10^{10}$ м⁻²с⁻¹. Инверсия знака имела место с 21:00 24 сентября до 02:00 25 сентября.

Во время ионосферной бури 20 марта 2003 г. ($A_p = 21$, $F_{10.7} = 108$) вблизи захода Солнца наблюдалось квазипериодическое изменение V_z примерно от +10 м/с до -35 м/с и далее до +20 м/с на высоте 300 км в интервале времени 17:00—19:00 [11]. Таким образом, отклонение V_z в сторону отрицательных значений составляло приблизительно 50 м/с. В рассматриваемый день 20 января 2010 г. аналогичное изменение V_z на высоте 300 км наблюдалось несколько ранее, с 15:00 до 18:00, а его амплитуда составляла 14 м/с. Такое отличие можно объяснить умеренностью рассматриваемой бури по сравнению с бурей 20 марта 2003 г. различием сезона и солнечной активности.

В отличие от рассматриваемой, сверхсильная магнитная буря 29 — 31 мая 2003 г. ($A_p = 89, 49, 17$, $F_{10.7} = 142, 120, 116$ соответственно) сопровождалась значительными вариациями скорости V_z [2]. В частности, в районе полудня 30 мая скорость на высоте 300 км изменилась в сторону отрицательных значений на 52 м/с по сравнению со спокойным днем. Отметим, что в возмущенный день 30 мая 2003 г. наблюдалось изменение V_z в

восходный период (около 02:00 — 05:00), которое накладывалось на утреннее поведение скорости V_z и изменяло ее знак с положительного на отрицательный. Отклонение V_z на высоте 300 км достигло 38 м/с. В восходный период рассматриваемой бури 21 января 2010 г. на этой же высоте максимальное отклонение V_z в сторону отрицательных значений составило приблизительно 30 м/с. Отличие результатов измерений в мае 2003 и январе 2010 гг. состоит также в том, что в 2003 г. наблюдалось запаздывание экстремума возмущения V_z в утренний период при уменьшении высоты (на высоте 600 км экстремум V_z был зарегистрирован в 02:40, на высоте 300 км — в 02:50, на высоте 200 км — в 03:15), а в аналогичный период в 2010 г. наблюдалось обратное (на высоте 418 км экстремум V_z был зафиксирован в 04:00, на высотах 363 и 308 км — в 03:45, на высоте 253 км — в 03:30). Еще одной особенностью наблюдений в возмущенный день 30 мая 2003 г. являлся нисходящий поток плазмы после полудня, величина плотности которого на высоте 308 км, равная $-1.6 \cdot 10^{13}$ м⁻²с⁻¹, превышала значение в период захода Солнца, чего не наблюдалось в январе 2010 г. (см. табл. 1).

Как и ожидалось, весьма умеренная магнитная буря сопровождалась незначительными изменениями параметров ионосферы по сравнению с сильнейшими геокосмическими бурями.

ВЫВОДЫ

В работе изложены результаты исследования и моделирования динамических процессов в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20 — 21 января 2010 г. Основные итоги работы сводятся к следующему.

1. Обнаружено, что 20 — 21 января 2010 г. над Харьковом наблюдалось слабое отрицательное ионосферное возмущение с максимальным отклонением критической частоты до 17 %.

2. Зарегистрировано уменьшение концентрации электронов $N_m F2$ до 34 % в период отрицательного возмущения. В начале МБ уменьшение $N_m F2$ составило около 30 %, а уже 22 января началась фаза восстановления.

3. Обнаружено относительно небольшое уменьшение (до 50 — 200 К) дневных температур

электронов T_e во время бури. Выявлены значительные суточные вариации температуры электронов и ее локальный минимум около полудня, что характерно для минимума SA. Температура ионов T_i изменялась незначительно (не более чем на 50 K). В околополуденные часы ионосферные возмущения слабо повлияли на температуру ионов.

4. Обнаружены отклонения временных вариаций вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z во время бури в вечернее и ночное время, а также на фоне обычно регистрируемого утреннего экстремума V_z . Амплитуда отклонений V_z увеличивалась с высотой. На высоте около 300 км отклонение V_z в сторону отрицательных значений достигло 14 м/с в 16:00 20 января 2010 г. и 30 м/с — в 03:45 21 января. На протяжении периода наблюдений в основном сохранились характерные особенности суточных вариаций скорости V_z , что объясняется весьма умеренным характером бури. На разных стадиях наблюдений в одинаковое время суток днем различие значений V_z не превышало 9 м/с. Вызванные бурей вариации плотности потока плазмы составляли величину 15 — 80 %.

5. Установлено, что слабое отрицательное ионосферное возмущение не повлияло на поведение температуры нейтрального газа. Высота термпаузы, где ионосфера становится изотермичной, составила около 300 км. Подтверждено, что модель NRLMSISE-00 дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами в дневное время.

6. Моделирование показало, что во время слабого отрицательного возмущения концентрации молекулярного азота $N(N_2)$ и кислорода $N(O_2)$ немного уменьшились (примерно на 13 и 11 % соответственно), а параметр p увеличился приблизительно на 7 %.

7. Расчеты теплового режима ионосферы показали преобладание потерь энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами над потерями, связанными со столкновениями электронов с нейтралами, днем 21 января на высоте $h = 300$ км. 22 января (после бури) вклад двух механизмов охлаждения электронов сравнялся. 21 января скорости нагрева электронного газа

и теплообмена электронов с ионами и атомами кислорода уменьшились.

8. Весьма умеренная магнитная буря, как и следовало ожидать, сопровождалась в целом незначительными изменениями параметров ионосферы.

1. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИ-ЭР. — 1969. — 57, № 3. — С. 6–30.
2. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А. и др. Возмущения ионосферной плазмы во время сверхсильной магнитной бури 29–31 мая 2003 года: результаты наблюдений на радаре некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. — 2005. — № 4. — С. 21–39.
3. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7 — 10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 4. — С. 62–76.
4. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в ионосфере, сопутствующих геомагнитной буре 25 сентября 1998 г., при помощи радара некогерентного рассеяния в Харькове // Распространение радиоволн: Тр. XX Всероссийской науч. конф. — Нижний Новгород, 2002. — С. 56–57.
5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 4–11.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэронаука. — 2007. — 47, № 6. — С. 761–779.
7. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 5. — С. 58–76.
8. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. — 2007. — 13, № 5. — С. 77–96.
9. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2003. — № 9. — С. 57–94.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 12–25.

11. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 20—23 марта 2003 года: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 3/4. — С. 4—19.
12. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Сильнейшая геокоsmическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 3/4. — С. 56—67.
13. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокоsmической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждений // *Космічна наука і технологія*. — 2007. — **13**, № 4. — С. 77—90.
14. 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—56.
15. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F-ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* — 2004. — Вып. 136. — С. 102—108.
16. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 190 с.
17. Павлов А. В., Павлова Н. М., Макаренко С. Ф. Изучение теплового баланса ионосферы и плазмосферы средних широт по данным станции «Миллстоун-Хилл» с 14 по 17 января 1986 г. // *Геомагнетизм и аэрoномия*. — 2004. — **44**, № 2. — С. 204—215.
18. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // *Геомагнетизм и аэрoномия*. — 2001. — **41**, № 5. — С. 659—666.
19. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокоsmоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59—106.
20. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. — 2007. — **5**, № 4. — С. 198—231.
21. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
22. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // *Солнечно-земная физика: Сб.* — М.: Мир, 1969. — С. 292—352.
23. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., et al. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100A**, N 8. — P. 14,673—14,691
24. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lazorenko S. V., Taran V. I. Wave Disturbances in the Ionosphere Accompanying the Solar Flare and the Strongest Magnetic Storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2003. — **43**, N 6. — P. 718—735.
25. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., and Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.* — 2007. — **7**, G13001 — doi: 10.1029/2005GI000125.
26. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quast-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // *Eos Trans. Am. Geophys. Union*. — 2000. — **81**, N 48. — Fall Meeting. — F 947.
27. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. I. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event September 25, 1998 // *Eos Trans. Am. Geophys. Union*. — 2001. — **82**, N 20. — Spring Meeting. — S 291.
28. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107**, N 12. — P. 1468—1483.
29. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2* / Ed. by H. Volland. — Boca Raton, Fla., CRC Press, 1995. — P. 195—248.
30. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement // *J. Geophys. Res.* — 1994. — **99A**, N 12. — P. 23,359—23,365.
31. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.* — 1973. — **13**. — P. 267—286.
32. Salah J. E., Evans J. V., Alcaydè D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin // *Ann. Geophys.* — 1976. — **32**. — P. 257—266.
33. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys. Space Phys.* — 1978. — **16**, N 3. — P. 355—399.

Надійшла до редакції 10.12.10

I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, S. A. Pazura,
S. V. Kharytonova, L. F. Chernogor

DYNAMIC PROCESSES IN THE IONOSPHERE DURING THE VERY MODERATE MAGNETIC STORM ON 20—21 JANUARY 2010

We present some results of our analysis of variations of ionospheric plasma parameters for the very moderate magnetic storm on 20—21 January 2010. The magnetic storm was accompanied by an ionosphere storm with negative phase. The observations was performed with the Kharkiv incoherent scatter radar. Numerical indices of perturbations are derived.

УДК 551.510.535: 550.388.2

Л. Ф. Черногор^{1,2}, В. В. Барабаш²

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

²Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

ОТКЛИК СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 4 ЯНВАРЯ 2011 г. В ХАРЬКОВЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Описано результати спостережень динаміки іоносфери на висотах 100 — 250 км протягом часткового (фаза 0.78) сонячного затемнення 4 січня 2011 р. поблизу м. Харкова. Сонячне затемнення викликало перебудову іоносфери на всіх висотах спочатку до нічних умов, а потім — до денних. Критична частота шару F2 зменшилася у 2.1 рази. Запізнення цих варіацій відносно моменту головної фази покриття сонячного диску склало близько 16 хв. Діюча висота відбиття сигналу поблизу максимуму іонізації шару F2 зросла на 70 км, а висота модельного параболічного шару h_p — на 10 км. Виявлено зменшення електронної концентрації та підсилення квазіперіодичних варіацій (з періодами близько 30 і 60 хв) протягом сонячного затемнення.

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты солнечного затмения (СЗ) в ионосфере изучались с 1920-х гг. разными методами [1, 2, 4–8, 13–15]. Наиболее полную информацию о процессах в ионосфере в широком диапазоне высот (100 – 1000 км) получают при помощи метода некогерентного рассеяния [1, 2, 4–6, 13–15]. В то же время значительный объем информации об ионосфере ниже максимума ионизации получен при помощи ионозондов. Мировая сеть ионозондов работает практически в непрерывном режиме. Метод вертикального зондирования (ВЗ), реализуемый в ионозондах, давно применяется для наблюдения эффектов СЗ в ионосфере [7].

Исследования эффектов СЗ остаются актуальными и сегодня по следующим причинам. Во-первых, каждое СЗ проходит при определенных гелиогеофизических условиях. Во-вторых, как показывают наблюдения, отклики ионосферы на затмения могут заметно различаться. Поэтому наибольший интерес представляет иссле-

дование особенностей отклика ионосферы при каждом конкретном СЗ.

Цель настоящей работы — изложение результатов наблюдения методом вертикального зондирования особенностей перестройки ионосферы в период частного СЗ 4 января 2011 г. вблизи г. Харькова. Это затмение существенно отличается от других тем, что оно имело место на стадии роста солнечной активности, в утреннее время, и продолжалось около трех часов (другие затмения длились около двух часов).

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Краткие сведения о затмении. СЗ наблюдалось после восхода Солнца в Северной Африке. Главная фаза (0.37) в Марокко имела место около 07:38 (здесь и далее мировое время). Затененная область пересекла всю Европу и часть Азии. СЗ закончилось примерно в 10:25 над Пакистаном (фаза 0.09). Ширина области полного СЗ составляла около 200 км, а скорость ее движения — около 700 — 800 м/с.

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) покрытие диаметра диска Солнца составляло около 0.78. При этом максимальная зате-

ненная относительная площадь диска $A_{\max} \approx 0.71$. Солнечное затмение началось в 07:30, а закончилось в 10:29, главная фаза имела место в 08:59.

Состояние космической погоды в период с 1 по 5 января 2011 г. удобно представлять в терминах временных вариаций концентрации, скорости, температуры и давления солнечного ветра, индукции межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу ϵ , а также индексов магнитной активности (K_p и D_{st}). С 1 по 5 января флуктуации плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно $1.5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, 420 км/с, $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$ и 4 нПа. Всплески величины ϵ достигали 6 ГДж/с. Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 0 до 3). Составляющая B_z хаотически варьировала в пределах $\pm (5 - 6)$ нТл. Малосущественными были флуктуации уровня B_y (около $\pm (4 - 6)$ нТл). Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах $\pm (10 - 15)$ нТл.

Можно утверждать, что день затмения, 4 января 2011 г., и контрольный день, 5 января 2011 г., были спокойными. Это обстоятельство существенно облегчало идентификацию возмущений, вызванных откликом средней ионосферы на СЗ.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью модифицированного ионозонда «Базис», кратко описанного в работе [7]. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.) вблизи г. Харькова.

Передачик ионозонда «Базис» работает в диапазоне частот 0.3 — 20 МГц. Выходная мощность составляет 10 кВт, длительность излучаемого импульса — 100 мкс. Частота следования импульсов может изменяться от 3.125 до 25 Гц.

Приемное устройство ионозонда «Базис» создано на основе супергетеродина с преобразованием частоты: в диапазоне частот от 0.3 до 2.3 МГц с двойным преобразованием, от 2.3 до 40 МГц — с тройным.

Приемная и передающая антенны ионозонда идентичны и расположены ортогонально. Каждая из антенн состоит из двух широкополосных

вертикальных ромбов. Малый ромб работает в диапазоне частот 6 — 20 МГц, большой — 0.3 — 6 МГц.

Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты области $F - 0.05$ МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Описание ионограмм. На рис. 1 представлены характерные ионограммы, полученные перед началом, в период и после окончания солнечного затмения 4 января 2011 г., а на рис. 2 — ионограммы, полученные в те же моменты времени в контрольный день 5 января 2011 г., когда отсутствовали значительные возмущения в ионосфере. На вертикальной оси, как обычно, обозначены действующие высоты отражения зондирующего сигнала, на горизонтальной — частота радиосигнала.

Отметим, что 4 и 5 января 2011 г. на протяжении практически всех измерений регистрировался слой E_s , который частично экранировал исследуемую область ионосферы. Это затрудняло получение качественных высотно-частотных характеристик. Тем не менее, имеющиеся ионограммы позволили с достаточной степенью выявить отклики средней ионосферы на СЗ.

До наступления СЗ ионосфера была спокойной. Об этом можно судить из рис. 1. Для Харькова основная часть СЗ припадает на околополуденные часы (по местному времени).

На ионограммах, полученных до начала СЗ, наблюдался незначительный рост критической частоты f_0F2 и несущественные колебания значений высоты слоя $F2$, что характерно для утреннего времени.

В течение затмения четко видны изменения ионограмм. С 08:30 до 09:15 высотно-частотным характеристикам были присущи диффузные отражения практически во всем диапазоне частот и высот.

В течение СЗ наблюдался мощный прерывистый отражающий слой в диапазоне высот 100 — 150 км, подобный слою E_s . Критическая частота этого слоя достигала 8.4 МГц. Наблюдался след, который можно назвать двукратным для слоя E_s . Его действующая высота изменялась от 210 до 240 км. Отражение от слоя E наблюдалось

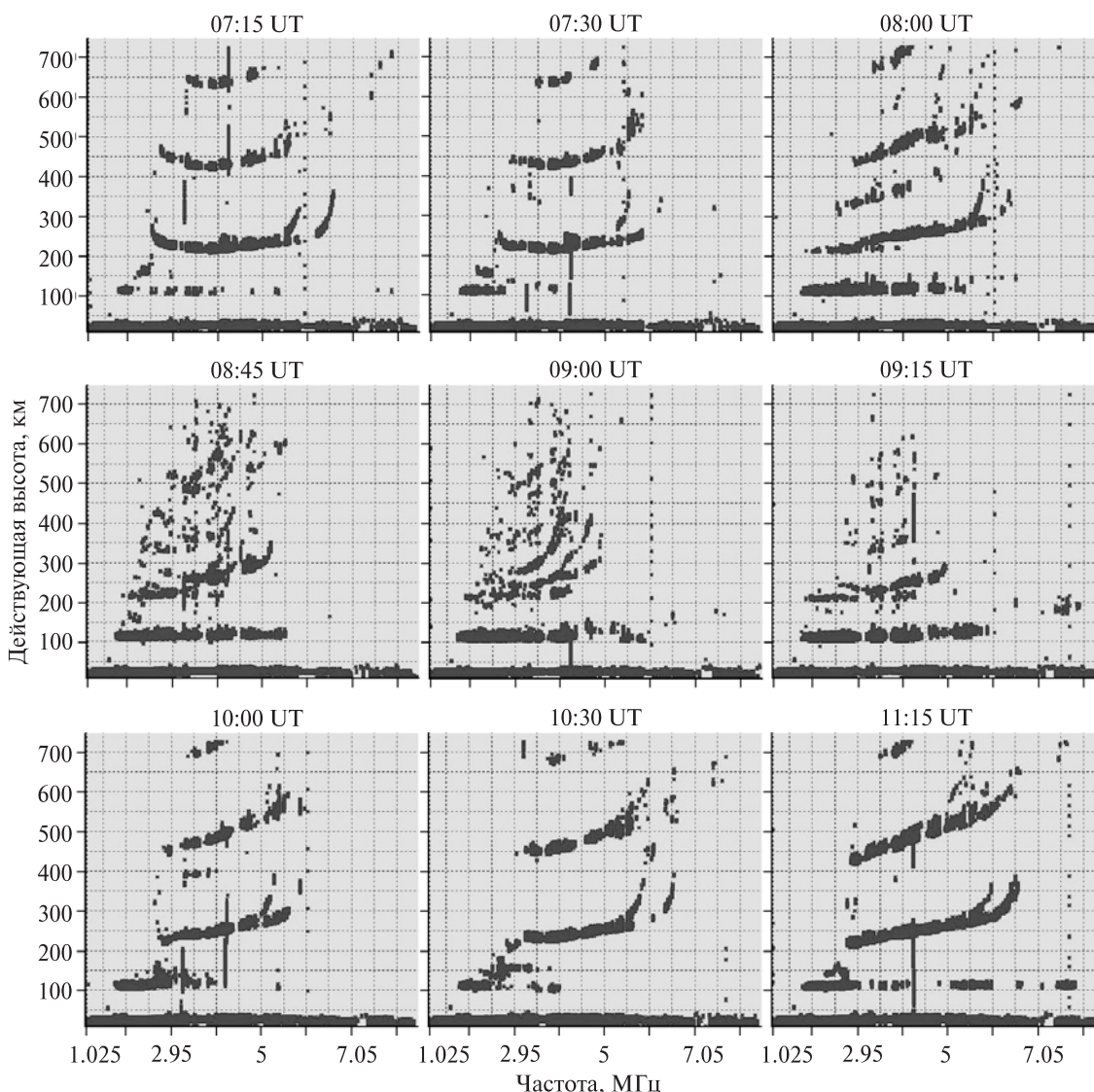


Рис. 1. Ионограммы до, в период 07:30 — 10:30 и после окончания солнечного затмения 4 января 2011 г.

нечетко. Минимальное значение критической частоты f_0E_{\min} оказалось близким к 2.2 МГц. Поскольку СЗ проходило в зимний период, то слой F1 на ионограммах не регистрировался.

На ионограммах, полученных в момент главной фазы СЗ, наблюдались наклонные отражения. Также отмечен рост действующей высоты, который в среднем составил около 70 км. Значение f_0F2 при этом уменьшилось приблизительно на 1.9 МГц.

Кроме основного следа от области F ионосферы, зафиксирован след, имеющий действующие

высоты 275 — 440 км с критической частотой, не превышающей 4 МГц. Такой след имел место в интервале времени с 07:35 до 10:00 UT.

По мере открывания солнечного диска отмечалось увеличение критической частоты F2. В момент окончания СЗ (10:29) значение f_0F2 почти достигло значения, наблюдавшегося до начала затмения. Действующая высота после увеличения в период затмения уменьшилась, и практически стала равна невозмущенному значению (в 11:00 отличие составляло не более 1 — 3 км). Ионограмма, полученная в 11:15, свиде-

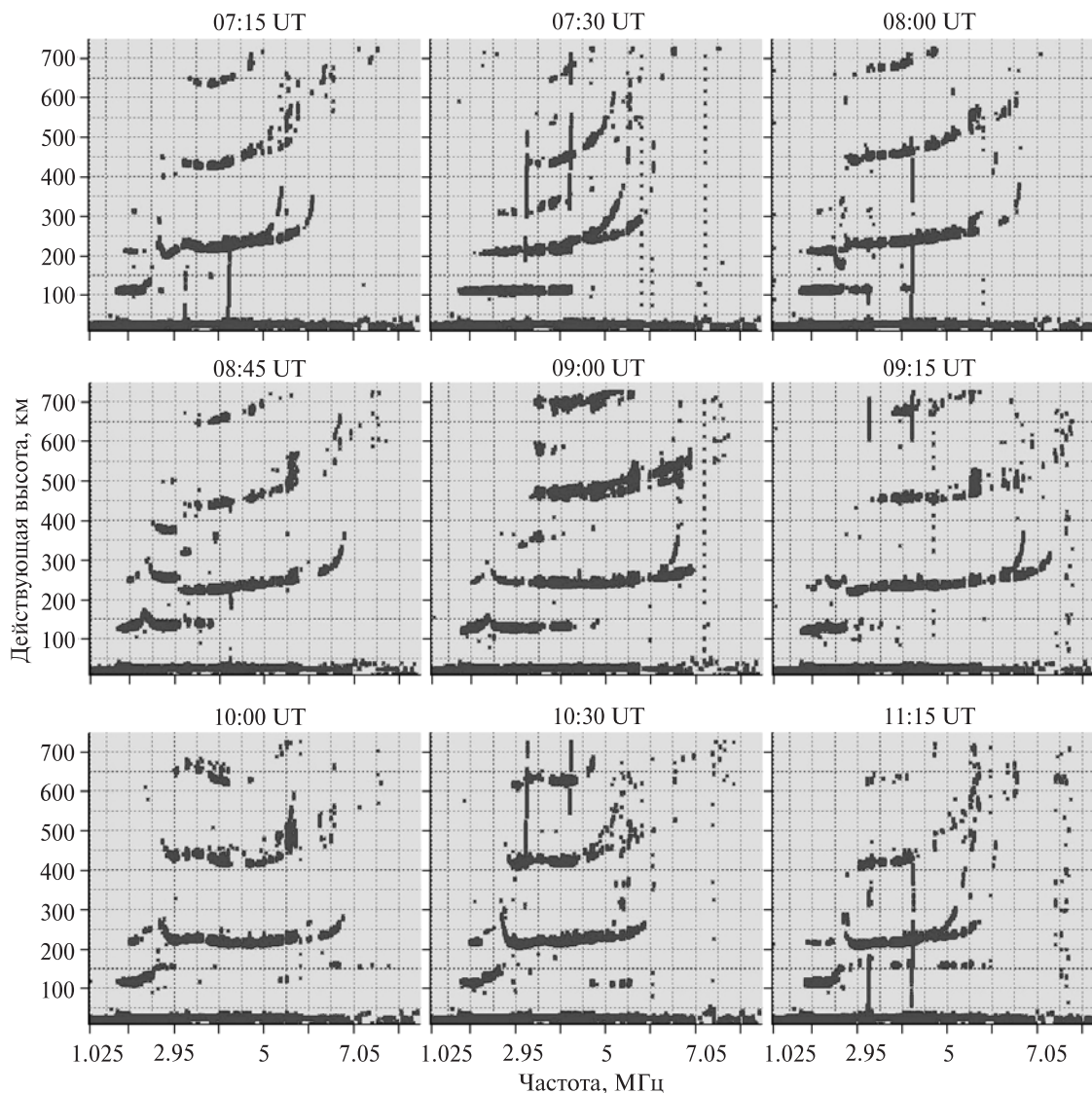


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для контрольного дня 5 января 2011 г.

тельствует о том, что через 45 мин после окончания СЗ вид ионограммы и ее параметры вернулись к состоянию, предшествующему моменту начала затмения.

На рис. 2 представлены ионограммы, полученные в контрольный день 5 января 2011 г. Их можно условно разделить на две группы. Ионограммы в первой группе имели характерный для околополуденного времени вид. Во второй группе на ионограммах наблюдался след с действующей высотой 300 — 400 км. Отметим, что по-

явление слоя не было таким регулярным, как в день СЗ. Достаточно уверенно он фиксировался лишь на отдельных ионограммах (07:15, 07:30, 09:30, 10:30, 10:45).

Слой *E_s*, как и 4 января 2011 г., был прерывистый, его критическая частота достигала 7.9 МГц. Высота слоя изменялась от 90 до 150 км. На некоторых ионограммах наблюдался двукратный и трехкратный след для слоя *E_s*. Для этих случаев действующие высоты изменялись от 195 до 220 км и от 300 до 320 км соответственно.

В отличие от дня СЗ, отражения от слоя *E* наблюдались более четко. Значение его критической частоты не превышало 2.7 МГц.

Видно, что в течение всего периода измерений ионограммы незначительно отличались как между собой, так и от ионограмм, полученных 4 января до начала и после окончания СЗ. Их поведение является типичным для невозмущенной ионосферы в околополуденное время.

Таким образом, качественный анализ ионограмм показал, что СЗ вызвало определенные изменения параметров ионограмм, а значит, и средней ионосферы.

Временные вариации критических частот. На рис. 3 представлены временные вариации критических частот области *F* ионосферы (f_0F2). Здесь и ниже сплошной линией с точками обозначены вариации параметров ионосферы в день солнечного затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. Сплошной тонкой линией на рисунках обозначены вариации параметров, обработанные методом скользящего среднего. Три вертикальными линиями отмечены моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

Затмение вблизи Харькова началось в утреннее время, когда имел место стремительный рост f_0F2 .

Из рис. 3 видно, что до затмения f_0F2 увеличивалась от 3.5 до 6.4 МГц. Незначительное уменьшение f_0F2 началось примерно за 20 мин до начала СЗ. По мере покрытия диска Солнца значения f_0F2 уменьшались примерно от 6.2 до 4.3 МГц. Им соответствовало уменьшение концентрации электронов от $N \approx 4.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до $N_{\min} \approx 2.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Максимальное значение уменьшения критической частоты слоя *F2* составило $\delta f_0F2 \approx 1.9 \text{ МГц}$. При этом уменьшение концентрации электронов равно $\Delta N = 2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $N_{\min} / N \approx 0.48$, $\delta_N = \Delta N / N \approx 52 \%$. Отметим, что минимальное значение f_0F2 и электронной концентрации в максимуме слоя *F2* наблюдалось в 09:15, т. е. с задержкой около 16 мин по отношению к моменту главной фазы СЗ.

Почти сразу же после начала СЗ значения f_0F2 изменялись по квазипериодическому закону.

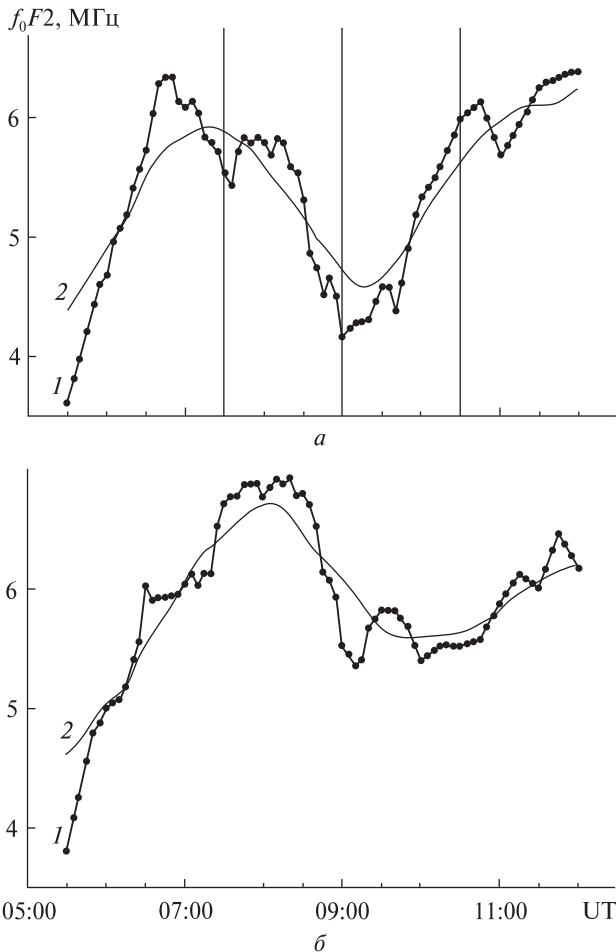


Рис. 3. Временные вариации критической частоты f_0F2 : *a* — в день затмения 4 января 2011 г. (1 — исходная зависимость, 2 — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же для контрольного дня 5 января 2011 г. Вертикальные линии здесь и далее — моменты начала, главной фазы и окончания затмения

Величина квазипериодов $T = 30$ и 60 мин, а их амплитуда $\delta f_{0a}F2 = 0.2$ и 0.4 МГц . Относительную амплитуду квазипериодических возмущений можно оценить из формулы

$$\delta_{Na} = \frac{\Delta N}{N} \approx 2 \frac{\delta f_{0a}F2}{f_0F2}, \quad (1)$$

где f_0F2 — среднее за период значение f_0F2 . Полагая $f_0F2 = 5 \text{ МГц}$, из (1) получим, что для $T = 30$ и 60 мин, δ_{Na} составляла 8 и 12 % соответственно. Продолжительность этого процесса составила около 2 ч.

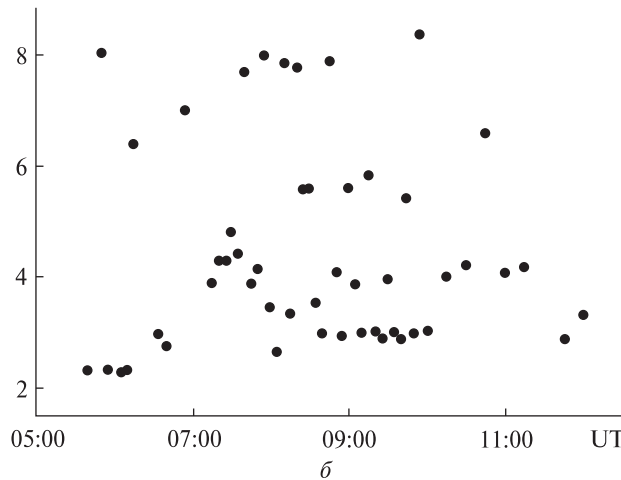
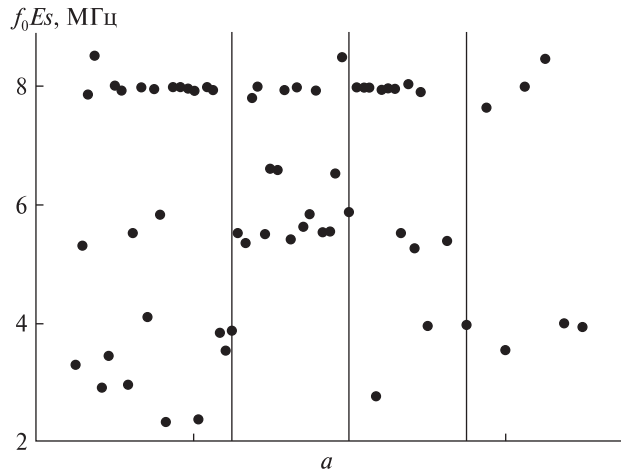


Рис. 4. Временные вариации критической частоты f_0E_s в день солнечного затмения 4 января 2011 г. (а) и в контрольный день 5 января 2011 г. (б)

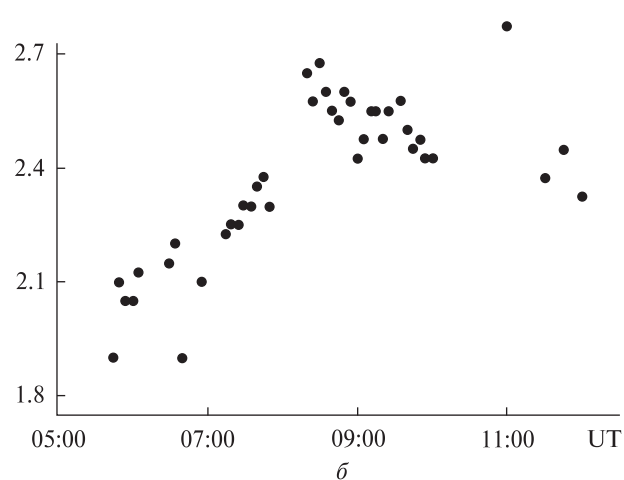
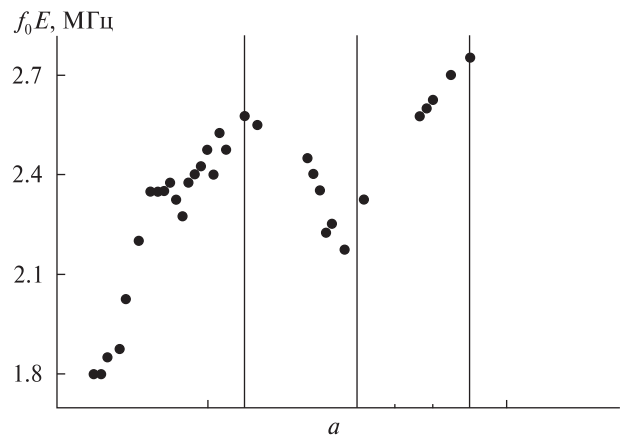


Рис. 5. Временные вариации критической частоты f_0E в день солнечного затмения 4 января 2011 г. (а) и в контрольный день 5 января 2011 г. (б)

В контрольный день подобного уменьшения значений f_0F_2 (и электронной концентрации) не наблюдалось. Отметим, что данные измерений f_0F_2 до начала СЗ и после окончания реакции критической частоты на СЗ близки к значениям f_0F_2 , полученным в соответствующие моменты времени в контрольный день.

Целесообразно сравнить уменьшение f_0F_2 в день СЗ с контрольным днем. Вблизи 09:15 в контрольный день в среднем $f_0F_2 \approx 6.2$ МГц. Тогда уменьшение f_0F_2 в день СЗ составляло 1.9 МГц. Это значение совпало со значением $\delta f_{0a}F_2$, приведенным выше.

Опишем кратко вариации критической частоты слоя E_s в день СЗ и в контрольный день (рис. 4). Видно, что 4 и 5 января частота f_0E_s сильно флуктуировала. Ее значение изменялось примерно от 2.5 до 8.5 МГц в день СЗ и от 2.3 до 8 МГц в контрольный день. В целом значения f_0E_s были большими в день затмения. Слой E_s при этом был мощнее и существенно экранировал область E .

Временные вариации критической частоты E приведены на рис. 5. В интервале времени 05:00 — 07:30 величина f_0E возрастала примерно от 1.8 до 2.3 — 2.6 МГц. В контрольный день она

продолжала увеличиваться примерно до 08:30, в течение ближайшего получаса она уменьшилась от 2.7 до 2.6 МГц. В течение следующего часа эта частота, флукутируя, оставалась в пределах 2.5 — 2.6 МГц.

В день затмения слой E наблюдался эпизодически. Вблизи главной фазы $S3 f_0 E$ примерно равнялась 2.2 МГц, т. е. ее значение уменьшилось примерно на 0.4 МГц (на 16 %) по сравнению с тем значением, которое было бы в отсутствие затмения. После момента наступления главной фазы частота $f_0 E$ постепенно увеличивалась от 2.2 до 2.8 МГц.

Временные вариации действующих высот. На рис. 6 показаны временные вариации действующих высот вблизи максимума ионизации слоя $F2$ в день затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. Видно, что по мере покрытия солнечного диска действующая высота $h'(f_0 F2)$, значение которой до начала $S3$ было приблизительно равно 350 км, увеличилась почти до 420 км в момент главной фазы $S3$ (08:59). Стремительный рост $h'(f_0 F2)$ произошел с 07:35 до 07:50. В период с 07:50 до 08:05 значение минимальной действующей высоты несколько уменьшилось, и в период главной фазы $S3$ оно равнялось 382 — 387 км.

С 09:45 до 10:30 (т. е. до окончания $S3$) произошло снижение значений $h'(f_0 F2)$ до невозмущенного затмением уровня. Отметим, что в контрольный день 5 января 2011 г. минимальные действующие высоты претерпевали несущественные изменения (в среднем $h'(f_0 F2) \approx 365 \pm 15$ км).

Временные вариации высоты h_p . Временные вариации высоты $h_p(F2)$ представлены на рис. 7, а. Поскольку слой $F1$ не регистрировался, слой $F2$ можно аппроксимировать параболическим слоем. При этом значения высоты $h_p(F2)$ приблизительно равны истинной высоте максимума электронной концентрации слоя. Напомним, что высота $h_p(F2)$ находится из условия $h_p = h'(f_p)$, где $f_p = 0.834 f_0 F2$.

Рассмотрим вначале контрольный день 5 января 2011 г. Высота h_p с 05:30 до 06:30 уменьшалась, а в интервале времени 06:30 — 07:45 она увеличивалась. С 07:45 до 09:25 наблюдалось

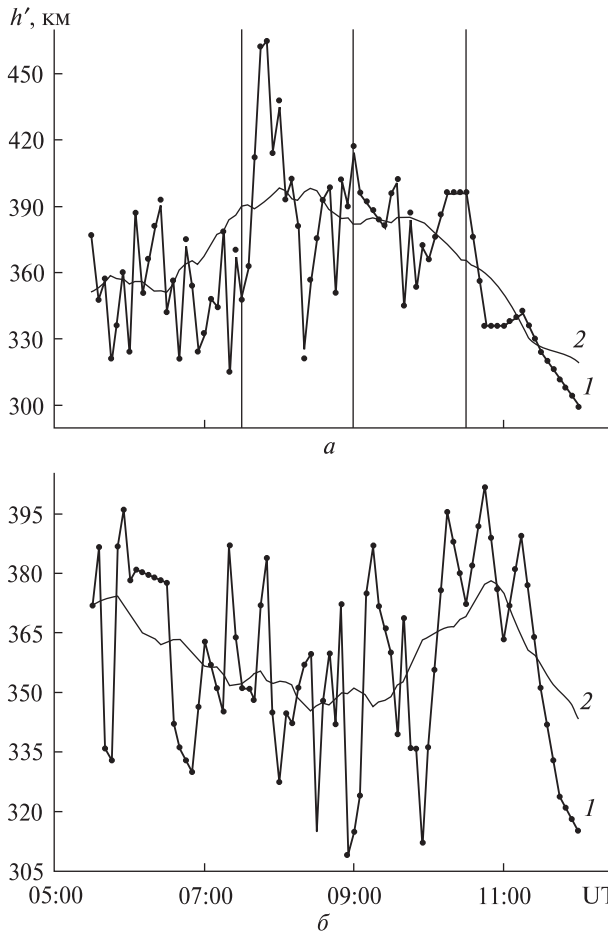


Рис. 6. Временные вариации действующей высоты h' отражения вблизи максимума ионизации слоя $F2$: а — в день затмения 4 января 2011 г. (1 — исходная зависимость, 2 — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), б — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

постепенное уменьшение $h_p(F2)$. Далее до 11:45 имело место увеличение h_p . Кроме таких регулярных изменений $h_p(t)$, имели место неупорядоченные изменения. Их относительная величина достигала 4 %.

4 января 2011 г. до начала $S3$ наблюдалось снижение $h_p(F2)$, и его значение к началу затмения (07:30) равнялось 230 км. В период с 07:30 до 08:30 отмечена тенденция к увеличению высоты h_p , что характерно для ночного времени. Начиная с 08:30 и до окончания $S3$ (10:30) среднее значение $h_p(F2)$ составляло около 237 км, т. е.

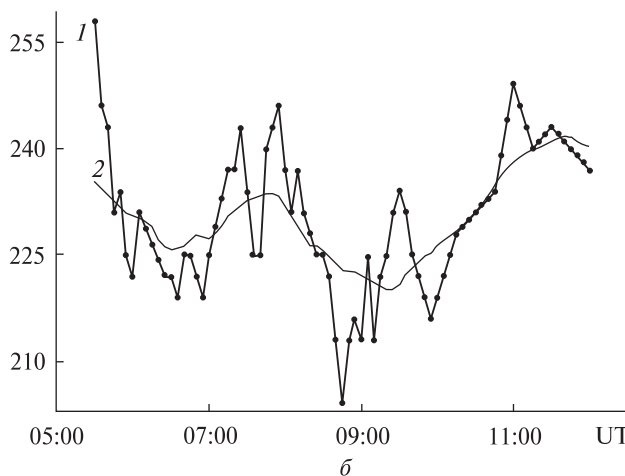
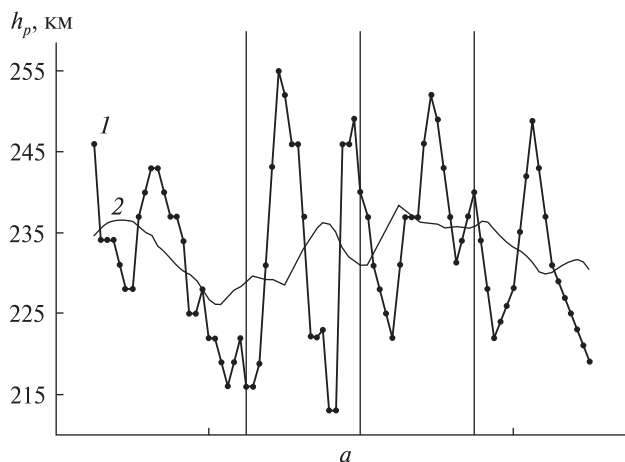


Рис. 7. Временные вариации высоты отражения h_p вблизи максимума ионизации слоя F2: *a* — в день затмения 4 января 2011 г. (*1* — исходная зависимость, *2* — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

значение высоты увеличилось почти на 10 км. После 11:20 значения h_p были ближе к значениям этого параметра, предшествующим затмению. Такое поведение h_p было лишь в среднем. Главным отличием временных вариаций 4 и 5 января было то, что в день СЗ имели место сильные колебания h_p . Их амплитуда достигала 21 км, или 9%. Период колебаний был близок к 60 мин. В 13:15 высота $h_p(F2)$ была приблизительно равна 230 км, что соответствует невозмущенному затмением состоянию ионосферы. Таким образом, увеличение h_p на 10 км свиде-

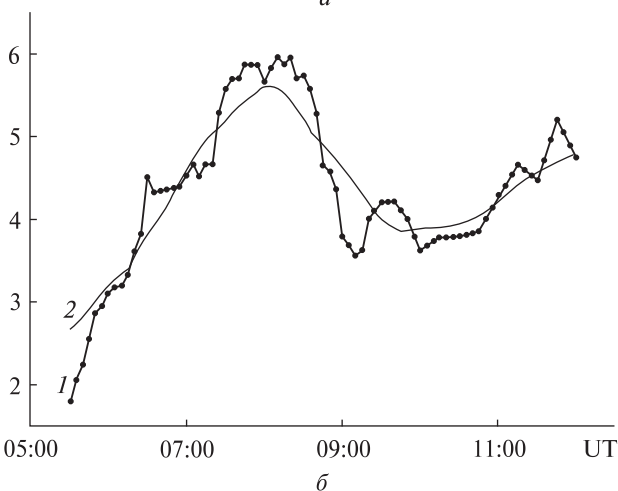
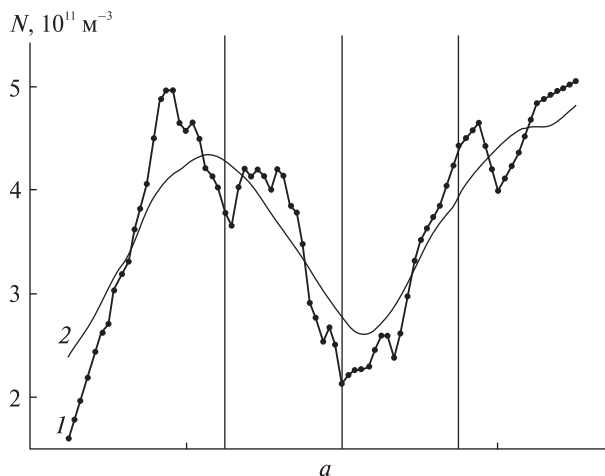


Рис. 8. Временные вариации электронной концентрации в максимуме ионизации слоя F2: *a* — в день СЗ 4 января 2011 г. (*1* — исходная зависимость, *2* — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

тельствует о влиянии СЗ на параметры средней ионосферы.

Временные вариации концентрации электронов в максимуме ионизации. Зависимость электронной концентрации в максимуме ионизации слоя $N(t)$ в день солнечного затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. показаны на рис. 8. Значения N получены из значений критических частот, измеренных с помощью ионозонда.

Сразу после начала СЗ происходило уменьшение электронной концентрации от $4.0 \cdot 10^{11}$ до $2.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Минимальное значение N_{\min} на-

блюдалось около 09:15, т. е. через 16 мин после момента наступления главной фазы СЗ. Максимальное уменьшение N приблизительно равно $1.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После главной фазы затмения электронная концентрация увеличивалась, и к его концу достигла значений $4 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. В контрольный день, 5 января 2011 г., с 05:30 до 08:10 концентрация электронов увеличивалась. В интервале времени 08:10 — 09:45 она уменьшалась. С 09:45 наблюдалось постепенное увеличение N . Таким образом, временные вариации N в день СЗ и в контрольный день существенно отличались.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации параметров ионограмм. Анализ ионограмм, полученных перед началом, в течение и после окончания СЗ, показал, что имели место значительные вариации всех их параметров. Конечно, наличие слоя E_s затрудняло наблюдение эффектов, вызванных затмением. Тем не менее, уверенно наблюдалось уменьшение критических частот слоя F_2 , достигавшее 1.9 МГц. После окончания затмения критические частоты практически вернулись к своим значениям, которые предшествовали СЗ. Минимальные значения f_0F_2 регистрировались с задержкой по отношению к моменту наступления главной фазы затмения, близкой с точностью до σ к 16 мин (σ — ошибка в отсчете времени при значении дискретности Δt). Известно, что $\sigma = \Delta t / \sqrt{12}$. При $\Delta t = 5$ мин имеем $\sigma \approx 1.4$ мин. Тогда задержка составила 16.0 ± 1.4 мин. Одновременно с вариациями f_0F_2 наблюдалось сначала увеличение приблизительно на 70 км действующей высоты $h'(f_0F_2)$, а затем ее уменьшение на такое же значение. Как и следовало ожидать, близкое к полному СЗ вызвало перестройку ионосферы сначала от дневных к ночным условиям, а затем в обратном направлении.

Кроме указанных вариаций, имели место квазипериодические изменения параметров ионограмм, свидетельствующие о том, что СЗ сопровождалось усилением волновой активности в ионосфере. Такое поведение ионограмм является достаточно типичным для периодов СЗ и в

целом соответствует результатам предшествующих наблюдений [7].

Диффузные отражения. В течение затмения с 7:30 до 11:30 высотно-частотные характеристики носили диффузный характер. Во всем диапазоне частот и высот имели место сильные нарушения слоистой структуры ионосферы. Скорее всего, все пространство между максимумами слоев E и F_2 было заполнено интенсивными ионосферными неоднородностями. Причиной их усиления, по-видимому, послужили гидродинамические неустойчивости в термосфере [12].

Вариации концентрации электронов. Рассмотрим подробнее высотно-временные вариации N , сопутствующие СЗ. С учетом процессов образования электронов и ионов, их рекомбинации и движения плазмы в вертикальном направлении со скоростью V_z для среднеширотной ионосферы уравнение непрерывности для N имеет вид [3]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) = q(t) - L, \quad (2)$$

где q — скорость ионизации, L — скорость потерь электронов.

При достаточно низкой солнечной активности высота максимума слоя F_2 в спокойных условиях не превосходит 230 — 250 км. Если высотными вариациями NV_z в слое ионосферы можно пренебречь, соотношение (2) сводится к уравнению

$$\frac{dN}{dt} = q(t) - L, \quad (3)$$

где $q(t) = q_0[1 - A(t)]$, $A(t) = S(t)/S_0$ — функция покрытия диска Солнца, S — площадь затененной части диска Солнца, S_0 — площадь последнего. Поскольку характерное время данного затмения $t_e \approx 90$ мин намного превышает время рекомбинационных процессов на высотах $z \leq 250$ км, соотношение (3) можно приближенно записать в виде

$$q \approx L. \quad (4)$$

В максимуме слоя F_2 скорость потерь [3]

$$L = \beta N, \quad (5)$$

где β — коэффициент потерь. Полагая, что в течение СЗ коэффициент β изменяется несущественно, из (4), (5) получим, что на заданной высоте

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q}{q_0} = 1 - A \equiv B. \quad (6)$$

Здесь $B(t) = 1 - A(t)$, N_0 — значение N в отсутствие СЗ. Вблизи главной фазы $A_{\max} \approx 0.71$, $B_{\min} \approx 0.29$. Тогда, исходя из (6), расчетное значение будет равно

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = 0.29.$$

При этом $\Delta N/N_0 = 1 - N_{\min}/N_0 = 0.71$. Значение $N_{\min}/N_0 = 0.29$ заметно отличается от экспериментально полученного значения 0.48. Причин расхождения три. Во-первых, на высотах 230 — 250 км уже нельзя считать, что $V_z = 0$. Во-вторых, при длительности СЗ около 3 ч заметно изменялись параметры нейтральной атмосферы, что повлекло за собой изменение коэффициента β . В-третьих, сдвиг высоты слоя $F2$ вверх в течение СЗ привел к уменьшению β .

Рассмотрим эти причины подробнее. Как показали синхронные наблюдения на харьковском радаре некогерентного рассеяния, в период главной фазы затмения в диапазоне высот 200 — 250 км $V_z(z) \approx -50$ м/с. Вблизи максимума слоя $F2$ $N(t) = \text{const}$. По этой причине в уравнении (2) $\partial(N V_z)/\partial z \approx 0$, т. е. процесс переноса не мог существенно повлиять на вариации $N(t)$, связанные с затмением.

Можно показать, что вариации концентрации нейтральных частиц и β в переходное время суток на высотах 200 — 300 км приближенно описываются линейной зависимостью. При этом

$$\beta(\Delta t) \approx \beta_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau} \right),$$

где $\tau \approx 4.5$ ч — характерное время переходных процессов, Δt — интервал времени после захода (начала затмения) Солнца. В период главной фазы СЗ $\Delta t \approx 1.5$ ч. Тогда $\beta(1.5) = 0.83 \beta_0$. За счет уменьшения N область отражения радиоволны сдвигается вверх на $\Delta z \approx 10$ км. В результате этого β уменьшается по закону

$$\beta(z) = \beta_0 e^{-\Delta z/H},$$

где H — приведенная высота нейтральной атмосферы. Согласно известным международным моделям нейтральной атмосферы вблизи 230 —

240 км (т. е. вблизи высоты максимума слоя $F2$ 4 января 2011 г.) $H \approx 45$ км. Тогда суммарное уменьшение β за счет последних двух причин в момент времени $\Delta t \approx 1.5$ ч с учетом того, что $\Delta z \ll H$, описывается соотношением

$$\beta \approx \beta_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau} - \frac{\Delta z}{H} \right) \approx 0.61 \beta_0.$$

При этом, согласно (5) и (6) расчетное значение

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{q}{q_0} \frac{\beta_0}{\beta} = B_{\min} \frac{\beta_0}{\beta} \approx 0.49,$$

что очень близко к полученному экспериментально значению 0.48.

Таким образом, СЗ привело не только к уменьшению N , но и к уменьшению примерно на $\Delta t/2\tau \approx 17$ % концентрации нейтральных частиц на высотах вблизи слоя $F2$.

Обсудим времена становления N . Исходя из высотной зависимости β , приведенной, например, в работах [9, 11], можно показать, что в слое $F2$ на высоте $z = 230$ км $\beta \approx 10^{-3} \text{c}^{-1}$. Тогда время становления концентрации электронов $t_N = \beta^{-1} \approx 1000 \text{c} \approx 16.7$ мин. Значение t_N близко к тому, что наблюдалось экспериментально (16.0 ± 1.4 мин).

В E -области справедлив квадратичный закон рекомбинации. Вместо (4), (5) имеем соотношение

$$q = \alpha N^2,$$

где α — коэффициент рекомбинации. В отсутствие затмения $q_0 = \alpha_0 N_0^2$. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{q}{q_0}} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} B(t)}.$$

При $B_{\min} = 0.29$ и $\alpha \approx \alpha_0$ имеем $N_{\min}/N_0 \approx 0.54$, а $fE_{\min}/fE \approx 0.73$. При этом относительное изменение $f_0 E$ должно быть равно 27 %. Из ионограмм получено, что оно близко к 16 %, а $N_{\min}/N_0 \approx 0.70$. Таким образом, оцененное из эксперимента значение N_{\min}/N_0 превышало расчетное на 16 %. Это различие может быть обусловлено среднеширотным высыпанием электронов из магнитосферы, описанным в работе [10].

Таким образом, высотно-временные вариации N в течение СЗ соответствуют представле-

ниям о физико-химических процессах в средней ионосфере (высоты 100 — 250 км).

Волновые возмущения. Как показал спектральный анализ, затмение сопровождалось увеличением амплитуды квазипериодических колебаний f_oF2 приблизительно на 0.2 и 0.4 МГц с периодом 30 и 60 мин соответственно. При этом относительная амплитуда колебаний концентрации электронов δ_{Na} составляла 8 и 16 %. Квазипериодические вариации усилились примерно за 1 ч до начала СЗ. Продолжительность вариаций с $T \approx 60$ мин составляла 5 — 6 ч, с $T \approx 30$ мин — около 3 ч.

В контрольный день колебания f_oF2 были выражены слабо, по крайней мере в интервале времени с 07:30 до 08:50. Средняя амплитуда составляла 0.1 — 0.2 МГц, т. е. была меньше приблизительно в два раза. При этом $\delta_{Na} \approx 3.5 \dots 7$ %. Период преобладающих колебаний изменялся в пределах 50 — 90 мин.

Различие периодов и амплитуд колебаний в день СЗ и контрольный день позволяет предположить, что именно СЗ вызвало усиление колебаний параметров ионосферы. Об усилении волновой активности в период СЗ также свидетельствуют квазипериодические вариации высоты h_p с периодом около 60 мин. Относительная амплитуда этих вариаций достигала 9 %.

Природа возникновения колебаний в ионосфере, скорее всего, связана с генерацией волн в нейтральной атмосфере в результате охлаждения атмосферного газа и сверхзвукового движения области тени. Волны в нейтральной атмосфере модулировали концентрацию электронов в ионосфере, что и наблюдалось методом ВЗ.

Значения периодов и амплитуд квазипериодических колебаний свидетельствуют о том, что СЗ сопровождалось генерацией внутренних гравитационных волн.

ВЫВОДЫ

1. Солнечное затмение вызвало значительную перестройку ионосферы в течение затмения. В частности, критические частоты слоев $F2$ и E вблизи главной фазы уменьшились на 1.9 МГц и 0.4 МГц, или на 31 % и 16 % соответственно.

2. Солнечное затмение сопровождалось заметным уменьшением концентрации электронов на высотах средней ионосферы. Так, в максимуме слоя $F2$ относительное уменьшение концентрации электронов равнялось примерно 52 %. Время запаздывания вариаций N составляло около 16.0 ± 1.4 мин. В E -области N уменьшилось примерно на 30 %.

3. Солнечное затмение привело к увеличению действующей высоты отражения в максимуме слоя $F2$ до 70 км.

4. Затмение вызвало увеличение высоты h_p до 10 км.

5. В течение затмения ионограммы были диффузными, что отражало факт сильной турбулентности ионосферы.

6. Подтверждено, что в максимуме слоя $F2$ справедлив линейный закон рекомбинации, в E -области — квадратичный закон. Физико-химические процессы в этих слоях соответствовали существующим представлениям.

7. Солнечное затмение сопровождалось увеличением (по сравнению с фоновым днем) относительной амплитуды квазипериодических вариаций концентрации электронов примерно в два раза (до 8 и 16 % для периодов 30 и 60 мин). Различались и периоды колебаний. Параметры квазипериодических возмущений соответствовали параметрам внутренних гравитационных волн.

Авторы благодарны И. Б. Склярову за проведение наблюдений на ионозонде.

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 аэрономия. — 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. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. Емельянов Л. Я., Склярков И. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 4. — С. 12—21.
 8. 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.
 9. Физика верхней атмосферы / Под ред. Дж. А. Ратклифа. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. — 1963. — 504 с.
 10. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. — 2000. — **5**, № 4. — С. 371—375.
 11. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэронаука. — 2010. — **50**, № 3. — С. 361—376.
 12. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 310 с.
 13. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 1. — P. 131—142.
 14. Evans J. V. On the behavior of foF2 during solar eclipses // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 3. — P. 733—738.
 15. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. — 1986. — **91**, N A2. — P. 1651—1660.

Надійшла до редакції 12.03.11

L. F. Chernogor, V.V. Barabash

THE RESPONSE OF THE MIDDLE IONOSPHERE
TO THE SOLAR ECLIPSE OF 4 JANUARY 2011
IN KHARKIV: SOME RESULTS OF VERTICAL
SOUNDING

We describe our results of observations for the ionosphere dynamics at heights from 100 to 250 km during the partial (about 0.78) solar eclipse on 4 January 2011 near Kharkiv. The solar eclipse caused some modification of the ionosphere at all heights at first to the nightly conditions, and then to daily ones. The critical frequency of the F2-layer decreased by a factor of 2.1. The delay of these variations with respect to the main magnitude of the solar disk obscuration was equal to about 16 min. The virtual height of signal reflection near the maximum of the F2-layer ionization increased by 70 km, and the height of the model parabolic layer, h_p , increased by 10 km. During the solar eclipse, some decrease in electron density and growth of quasi-periodic variations with periods of about 30 and 60 min are detected at all observable heights.

УДК 523.683; 520.8; 52.126; 52.128; 52.13; 52.14

П. М. Козак, О. О. Рожило, Ю. Г. Тарануха, В. Г. Кручиненко

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

КІНЕМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРЕСНЕВИХ МЕТЕОРІВ ЗА БАЗИСНИМИ ТЕЛЕВІЗІЙНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ 2003 РОКУ

Наведено результати базисних телевізійних спостережень метеорів, що проводились у вересні 2003 р. на спостережних станціях Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Аналізується проблема визначення точності обчислень кінематичних параметрів метеора. Наведено таблиці обчислених геоцентричних та геліоцентричних характеристик 80 базисних метеорів. Побудовано статистичні розподіли основних метеорних параметрів. Аналізуються деякі отримані аномальні характеристики метеорів.

ВСТУП

Вивчення навколоземного метеорного комплексу пов'язане з вирішенням як фундаментальних фізичних задач (розподіл навколоземної матерії за фізичними характеристиками, походження метеорної речовини в аспекті космогонії Сонячної системи, зв'язок метеорних потоків з кометами, взаємодія метеорної речовини з атмосферами планет), так і ряду прикладних задач (безпека космічних польотів, розробка термостійких покриттів космічних апаратів та ін.). Особливо актуальним є накопичення даних спостережень метеорів в оптичному діапазоні, оскільки сучасні бази даних менш точних радіолокаційних спостережень нараховують мільйони орбіт [6], в той час як центр метеорних даних Міжнародного астрономічного союзу [MDC IAU, <http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007>] нараховує на сьогодні лише 4581 орбіту метеорів, отриманих за допомогою фотографічних спостережень [14]. Ситуація з телевізійними спостереженнями дещо краща — існує ряд публікацій про обчислені кінематичні характеристики метеорів [7–9,

13, 15]. Окремо можна виділити досягнення японських любителів астрономії, які за підтримки корпорації SonotaCo з допомогою відеокамер сучасного покоління, у співробітництві з міжнародною метеорною організацією любителів метеорних спостережень [International Meteor Organization: <http://www.imo.net>] та за консультативного сприяння професіоналів метеорної астрономії створили каталог кінематичних параметрів 39208 метеорів [13]. На жаль, характеристики метеорів — радіанти, швидкості, елементи геліоцентричних орбіт — розраховувалися автоматично за допомогою програмного забезпечення [SonotaCo “UFCaptureV2 Users Manual”, <http://sonotaco.com/soft/UFO2/help/english/index.html>; SonotaCo “UFOAnalyzerV2”, <http://sonotaco.com/soft/download/UA2Manual EN.pdf>; SonotaCo “UFOOrbitV2 Users Manual”, <http://sonotaco.com/soft/UO2/UO21Manual EN.pdf>] і не перевірялися на достовірність. Камери, що використовувалися, були малочутливими — максимум розподілу метеорів за зоряними величинами відповідає блиску $+1^m$, найслабші метеори, що реєструвалися, мали блиск $+4^m \dots +4.5^m$ [13]. Отже, спостереження слабкосвітливих метеорів ($+6^m \dots +8^m$) та визначення їхніх параметрів є і до сьогодні актуальною задачею.

СПОСТЕРЕЖНА АПАРАТУРА

Для базисних спостережень метеорів в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (КАО) використовуються модернізовані телевізійні системи «Інтроскоп», побудовані на базі високочутливих передавальних трубок типу суперізокон Лі-804. Телевізійні камери оснащуються ширококутними фотографічними об'єктивами, найчастіше «Юпітер-3» ($F = 50$ мм, $F/1.5$), або «Геліос-40» ($F = 85$ мм, $F/1.5$). Дві такі установки для базисних спостережень розміщені в пунктах А (спостережна станція с. Лісники) і В (спостережна станція с. Пилиповичі), що знаходяться на відстані 54 км по хорді земного сфероїда. Телевізійна система працює в штатному режимі 25 кадрів/с, із черезстроковою розгорткою. Для визначення часу за допомогою таймерів в телевізійний кадр вдруковується час з точністю до 0.01 с. Спостережні дані реєструються в аналоговому вигляді за допомогою відеомагнітофонів типу VHS або S-VHS. Далі в лабораторних умовах результати спостережень переглядаються та вибірково оцифровуються відеопослідовності з метеорами в кадрах. Формат повного оцифрованого кадра загалом залежить від телевізійної системи та цифрувального пристрою, зазвичай 768×576 пкл. Шляхом зіставлення часу появи метеора в обох пунктах встановлюються спільні явища, обробка яких дає змогу визначити усі параметри метеора. Оскільки метеор — динамічний об'єкт, а телевізійна камера працює в черезстроковому режимі, то для уникнення накладання двох зображень метеора, які формуються в парних і непарних полях, рознесених в часі на 0.02 с, оцифровані відеопослідовності з метеорами (зазвичай файли у форматі AVI) програмно розбиваються на парні та непарні поля кадру. При використанні об'єктива «Юпітер-3» кутовий розмір поля приблизно складає $23.5 \times 19^\circ$, розмір пікселя $4'$, при використанні «Геліос-40» поле — $13 \times 11^\circ$, розмір пікселя $2.2'$. Для обчислення параметрів метеора достатньо опрацювати одну парну або непарну послідовність полів, при цьому часова роздільна здатність складатиме 0.04 с. Для підвищення точності обчислення швидкості метеора можна незалежно опрацювати парні та непарні поля, а перед базисною обробкою — об'

єднати дані. Тоді часова роздільна здатність складе 0.02 с.

МЕТОДИКА ОБРОБКИ

Методика обробки результатів телевізійних спостережень метеорів була розроблена раніше та описана в ряді публікацій. Методи вимірювань об'єктів у кадрі обговорюються в роботі [2]. Астрометричну обробку, а саме вибір редуційної моделі, просторової зони та кількості опорних зір та інших факторів, що визначають точність обчислення екваторіальних координат точок на зображенні метеора, описано в роботі [4].

Для базисної обробки двох відеопослідовностей одного і того ж метеора, отриманих з двох пунктів, використовується розроблений у метеорній групі КАО векторний метод [5]. Він дає змогу визначити просторові характеристики траєкторії метеора у атмосфері Землі (висота появи, максимум блиску та зникнення; дальність до метеора від пунктів спостереження; видимі та геоцентричні швидкості та екваторіальні координати радіанта метеора та ін.), елементи геліоцентричної орбіти метеора, блиск метеора. Згадані методи обробки закладені в оригінальне програмне забезпечення «Falling star» [10, 11], що дозволяє проводити обробку у ручному та напівавтоматичному режимах (реалізація програми з повністю автоматичним режимом перебуває на стадії розробки).

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Спостереження проводилися 19—24 вересня 2003 р. в рамках програми пошуку слабких метеорних потоків. Час спостережень Δt та кількість метеорів N , що були зареєстровані в обох пунктах, наведено у табл. 1, де С — спільні (базисні) метеори.

Досить велика частка з 80 зареєстрованих базисних метеорів — це надзвичайно слабкі метеори (до $+7^m$). Частина метеорів були дуже короткі і реєструвались лише на кількох кадрах, інші влітали з-за меж кадру або вилітали за кадр. Очевидно, точність обчислення параметрів метеорів за таких обставин не може бути високою.

Для того щоб визначити ступінь достовірності обчислюваних параметрів метеора, робилась оцін-

ка якості M_Q метеорного зображення по кожному з пунктів. Оцінка значною мірою суб'єктивна і варіює в межах 1–5. Для її визначення враховувалась інтенсивність зображення, близькість до краю кадру, наявність поблизу опорних зір, кількість кадрів з метеором. Відтак оцінка $M_Q = 5$ відповідає зображенню метеора з чіткими контурами, що дають змогу досить чітко встановити положення голови метеора, реєстрація метеора мінімум у 5–6 кадрах для якомога точнішого визначення швидкості, наявність навколо достатньо симетричної вибірки опорних зір. Найгірша оцінка $M_Q = 1$ відповідає надслабкому метеорові, який видно на 2–3 кадрах, має дифузну напівпрозору структуру (через мале відношення сигнал/шум) та розташований на межі кадру. У більшості випадків метеорні зображення з $M_Q = 1$ без спеціального досвіду не можуть бути візуально знайдені у відеопослідовності. Для порівняння якості реєстрації метеорів з різних пунктів були побудовані гістограми розподілів M_Q , приведені на рис. 1. Видно, що якість зображень в обох пунктах однакова, її типові значення — 3 бали, однак неякісні зображення (1–2 бали) складають досить великий відсоток.

Крім введеної оцінки, що описує якість зображення, на точність обчислення параметрів суттєво впливає ще один фактор, який може бути визначений лише після обробки. Це позиційний кут γ між напрямком руху метеора і напрямком на пункт спостереження. З огляду на методику базисної обробки метеорів [5, 11] та з геометричних міркувань похибки у визначенні радіанта та швидкості метеора будуть тим більші, чим менший кут γ . Оскільки похибки визначення кінематичних параметрів кожного індивідуального метеора обчислити досить складно, то для оцінки достовірності параметрів кожного з 80 метеорів була побудована табл. 2.

В табл. 2 наведено кількість кадрів N , на яких видно метеор, кути γ та оцінки M_Q . Також приводиться описова характеристика ВМЕ (Begin-Maximum-End), яка показує наявність у кадрі початку метеора, максимуму його блиску та кінця. Унікальним у цьому плані є метеор № 78, зареєстрований з пункту А — він не має в кадрі жодної зі згаданих точок. Як видно з табл. 1,

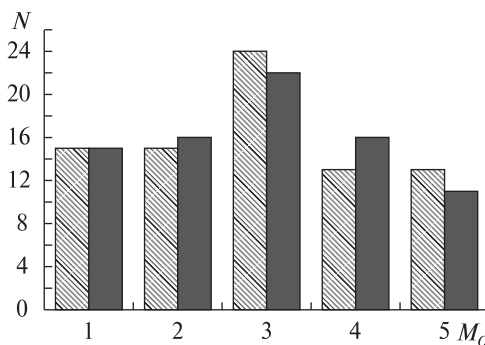


Рис. 1. Розподіл кількості базисних метеорів по значеннях M_Q оцінок якості зображень для двох пунктів спостережень: пункт А — світла штриховка, В — темна

кількість метеорів, що перебувають у кадрі повністю, значно вища для пункту В — 57 (71 %) проти 45 (56 %) для пункту А. Даний факт легко пояснюється напрямком орієнтації оптичних осей камер: у пункті А камера направлена в зеніт, і відтак охоплює меншу площу на висоті горіння метеорів. Щодо позиційних кутів, то кількість метеорів низької ($\gamma < 30^\circ$) та критичної ($\gamma < 20^\circ$) якості є такою: $N(\gamma < 30^\circ) = 17$ (21 %), $N(\gamma < 20^\circ) = 7$ (9 %) для пункту А та $N(\gamma < 30^\circ) = 20$ (25 %), $N(\gamma < 20^\circ) = 9$ (11 %) для В. З пункту А зареєстровано один практично стаціонарний метеор № 40 з $\gamma = 0.2^\circ$. Очевидно, точність обчислення інших параметрів цього метеора є надзвичайно низькою. Величина позиційного кута залежить від орієнтації оптичних осей камер та від радіантів індивідуальних метеорів, які для метеорів спорадичного фону розподілені хаотично. Найбільша похибка обчислень кінематичних параметрів буде для тих метеорів, позиційні кути яких малі для обох пунктів.

Таблиця 1. Час спостережень та кількість зареєстрованих метеорів

| Дата | Пункт А | | Пункт В | | С (спільні метеори) | |
|--------|------------------|-----|------------------|-----|---------------------|-----|
| | Δt , год | N | Δt , год | N | Δt , год | N |
| 19 | 4 | 7 | 4 | 29 | 4 | 4 |
| 20 | 4 | 16 | 4 | 26 | 4 | 2 |
| 21 | 3 | 17 | 4 | 30 | 3 | 11 |
| 22 | 4 | 27 | 5 | 43 | 4 | 25 |
| 23/24 | 7 | 49 | 7 | 68 | 7 | 38 |
| Всього | 22 | 116 | 24 | 196 | 22 | 80 |

Таблиця 2. Деякі характеристики метеорних зображень, що визначають точність обробки кожного індивідуального метеора

| Номер п/п | T | | B_M_E | | γ, град | | M ₀ | | Номер п/п | T | | B_M_E | | γ, град | | M ₀ | |
|-----------|----|----|-------|-----|---------|------|----------------|---|-----------|----|----|-------|-----|---------|------|----------------|---|
| | A | B | A | B | A | B | A | B | | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 1 | 13 | 12 | BME | BME | 23.7 | 21.0 | 4 | 4 | 41 | 11 | 13 | BME | BME | 16.3 | 42.4 | 3 | 4 |
| 2 | 4 | 4 | BME | BME | 19.3 | 24.5 | 2 | 2 | 42 | 5 | 4 | BME | BME | 41.0 | 35.6 | 3 | 3 |
| 3 | 8 | 11 | BME | BME | 58.7 | 31.6 | 3 | 3 | 43 | 41 | 9 | BME | BM_ | 42.6 | 32.9 | 5 | 2 |
| 4 | 9 | 16 | _ME | BM_ | 80.4 | 86.0 | 5 | 5 | 44 | 11 | 13 | BM_ | BME | 72.2 | 47.5 | 4 | 4 |
| 5 | 30 | 8 | BME | _ME | 22.8 | 47.3 | 5 | 3 | 45 | 12 | 15 | BM_ | BME | 43.4 | 14.2 | 5 | 4 |
| 6 | 5 | 4 | BME | BME | 43.6 | 38.0 | 3 | 3 | 46 | 3 | 9 | _E | _ME | 55.3 | 56.1 | 1 | 3 |
| 7 | 14 | 13 | _ME | BME | 32.4 | 60.1 | 3 | 2 | 47 | 12 | 14 | BME | BME | 26.1 | 52.7 | 3 | 4 |
| 8 | 16 | 33 | BM_ | BME | 59.4 | 31.2 | 5 | 5 | 48 | 6 | 5 | _M_ | BM_ | 41.5 | 56.4 | 2 | 2 |
| 9 | 7 | 9 | BM_ | BM_ | 22.6 | 20.8 | 4 | 3 | 49 | 8 | 6 | BME | BM_ | 15.8 | 32.5 | 2 | 2 |
| 10 | 7 | 9 | BM_ | BME | 52.3 | 49.5 | 5 | 3 | 50 | 14 | 21 | _E | _ME | 76.3 | 51.1 | 5 | 5 |
| 11 | 5 | 10 | _ME | _ME | 61.8 | 61.4 | 3 | 4 | 51 | 6 | 6 | BME | BME | 45.8 | 19.0 | 2 | 1 |
| 12 | 9 | 5 | BM_ | BME | 36.4 | 50.0 | 3 | 1 | 52 | 8 | 10 | BME | BME | 43.4 | 15.5 | 4 | 3 |
| 13 | 28 | 24 | _M_ | B_ | 20.3 | 49.9 | 5 | 5 | 53 | 6 | 7 | BME | BM_ | 37.6 | 46.3 | 1 | 1 |
| 14 | 4 | 6 | BME | BME | 44.8 | 31.3 | 1 | 1 | 54 | 5 | 7 | BM_ | BME | 83.8 | 80.7 | 2 | 3 |
| 15 | 9 | 7 | BME | BME | 50.6 | 51.6 | 4 | 2 | 55 | 10 | 10 | BME | BME | 42.5 | 59.6 | 3 | 4 |
| 16 | 6 | 6 | BME | BME | 72.9 | 47.2 | 3 | 3 | 56 | 4 | 16 | BM_ | B_ | 57.5 | 45.0 | 2 | 5 |
| 17 | 3 | 3 | BME | BME | 23.3 | 28.2 | 1 | 1 | 57 | 12 | 13 | _E | _ME | 62.8 | 55.9 | 3 | 4 |
| 18 | 18 | 30 | BM_ | BM_ | 76.8 | 84.8 | 4 | 4 | 58 | 6 | 13 | _M_ | _M_ | 77.5 | 79.6 | 4 | 5 |
| 19 | 6 | 8 | _ME | BME | 58.0 | 28.5 | 3 | 2 | 59 | 6 | 5 | _ME | _E | 65.6 | 55.0 | 4 | 3 |
| 20 | 7 | 6 | BME | BME | 31.5 | 58.5 | 2 | 2 | 60 | 8 | 25 | B_ | BME | 54.2 | 27.7 | 3 | 5 |
| 21 | 13 | 17 | BM_ | BME | 53.8 | 26.7 | 2 | 2 | 61 | 8 | 5 | BME | BME | 46.6 | 67.3 | 1 | 1 |
| 22 | 7 | 7 | BM_ | BM_ | 65.8 | 59.7 | 3 | 3 | 62 | 17 | 16 | BME | BME | 35.1 | 25.5 | 4 | 4 |
| 23 | 14 | 13 | BME | BME | 56.3 | 26.0 | 3 | 3 | 63 | 7 | 10 | BME | BME | 18.4 | 47.9 | 2 | 3 |
| 24 | 16 | 19 | BME | BME | 56.4 | 32.2 | 3 | 3 | 64 | 6 | 6 | BME | BME | 64.7 | 68.7 | 3 | 2 |
| 25 | 7 | 11 | _E | _ME | 61.5 | 51.7 | 4 | 4 | 65 | 6 | 5 | BME | BME | 47.6 | 45.9 | 3 | 2 |
| 26 | 7 | 11 | BME | BME | 58.2 | 46.8 | 3 | 4 | 66 | 5 | 3 | _E | BME | 25.0 | 5.9 | 2 | 1 |
| 27 | 4 | 3 | BME | BME | 49.6 | 50.1 | 2 | 1 | 67 | 5 | 17 | _E | BME | 26.7 | 24.9 | 1 | 4 |
| 28 | 13 | 15 | B_ | BME | 54.0 | 51.3 | 5 | 5 | 68 | 7 | 7 | BME | BME | 25.2 | 45.3 | 3 | 3 |
| 29 | 6 | 12 | _E | BME | 62.4 | 50.1 | 4 | 4 | 69 | 4 | 2 | BME | BME | 31.6 | 15.7 | 1 | 1 |
| 30 | 9 | 7 | BME | BME | 39.6 | 25.3 | 3 | 2 | 70 | 23 | 21 | BME | BME | 66.2 | 86.9 | 5 | 5 |
| 31 | 15 | 16 | BME | BME | 32.6 | 32.4 | 5 | 4 | 71 | 4 | 6 | B_ | BME | 42.4 | 46.8 | 2 | 2 |
| 32 | 9 | 6 | BME | BME | 37.0 | 54.4 | 3 | 2 | 72 | 12 | 12 | BME | BME | 43.5 | 47.9 | 4 | 3 |
| 33 | 32 | 34 | BME | _ME | 36.2 | 51.4 | 5 | 5 | 73 | 7 | 6 | BME | BME | 18.4 | 15.4 | 3 | 3 |
| 34 | 4 | 6 | B_ | BM_ | 81.9 | 74.2 | 2 | 1 | 74 | 5 | 4 | BME | BME | 9.2 | 38.8 | 1 | 1 |
| 35 | 6 | 8 | BME | BME | 41.3 | 61.2 | 2 | 3 | 75 | 10 | 9 | BME | BME | 60.8 | 84.6 | 2 | 3 |
| 36 | 23 | 23 | BM_ | BME | 50.6 | 49.6 | 5 | 5 | 76 | 16 | 15 | BM_ | BME | 59.4 | 70.8 | 4 | 4 |
| 37 | 4 | 10 | BME | BM_ | 59.7 | 86.5 | 1 | 2 | 77 | 3 | 4 | B_ | BME | 29.2 | 3.8 | 1 | 1 |
| 38 | 4 | 11 | BM_ | BM_ | 46.1 | 40.9 | 1 | 2 | 78 | 3 | 4 | _ | BME | 50.2 | 24.1 | 1 | 1 |
| 39 | 5 | 5 | BME | BME | 52.1 | 31.4 | 1 | 3 | 79 | 4 | 3 | BME | BME | 41.0 | 14.9 | 3 | 1 |
| 40 | 2 | 11 | BME | BM_ | 0.2 | 31.4 | 1 | 3 | 80 | 4 | 4 | BME | BME | 35.8 | 13.2 | 1 | 1 |

**ПАРАМЕТРИ ТРАСЕКТОРІЙ МЕТЕОРІВ
В АТМОСФЕРІ ТА ГЕОЦЕНТРИЧНІ
ВЕКТОРИ ШВИДКОСТЕЙ**

Отримані внаслідок базисної обробки кінематичні характеристики метеорів було розбито на дві групи: 1) геометричні характеристики траєкторій в атмосфері Землі, видимі координати радіантів та модулі їхніх швидкостей на нескін-

ченності (виправлені за обертання Землі навколо осі та за вплив атмосфери) та скориговані за гравітаційний вплив Землі, тобто геоцентричні параметри; 2) геліоцентричні параметри метеора — геліоцентричні радіанти та швидкості, елементи орбіти метеора.

У табл. 3 приведено дату, час реєстрації метеора, мінімальний час життя τ та мінімальну дов-

Таблиця 3. Параметри траєкторії метеорів у атмосфері, геоцентричні радіанти та модулі швидкості

| № п/п | Дата | Час | Δt , с | L , км | H_b , км | H_e , км | α_{Rinf} | δ_{Rinf} | v_{inf} , км/с | σ_v , км/с | α_{RG} | δ_{RG} | v_G , км/с |
|-------|------------|---|----------------|----------|------------|------------|---|-----------------|------------------|-------------------|---|---------------|--------------|
| 1 | 19.09.2003 | 19 ^h 30 ^m 16 ^s | 0.481 | 13.1 | 97.5 | 85.2 | 23 ^h 06 ^m 10 ^s | +40°02'59" | 25.892 | 0.908 | 23 ^h 10 ^m 26 ^s | +39°24'43" | 23.389 |
| 2 | 19.09.2003 | 20 42 04 | 0.141 | 4.7 | 104.2 | 99.0 | 23 55 18 | +49 22 46 | 38.066 | 3.372 | 23 57 00 | +49 19 44 | 36.411 |
| 3 | 19.09.2003 | 20 42 31 | 0.397 | 11.9 | 92.2 | 86.2 | 23 56 09 | -07 08 01 | 23.728 | 0.602 | 0 00 19 | -11 03 29 | 20.966 |
| 4 | 19.09.2003 | 21 25 30 | >0.648 | >31.2 | 98.1 | 88.9 | 10 26 46 | +55 16 10 | 47.314 | 0.553 | 10 28 04 | +54 03 43 | 45.992 |
| 5 | 20.09.2003 | 20 14 13 | >1.157 | >23.1 | 97.8 | 78.5 | 20 07 11 | +25 23 29 | 16.141 | 0.690 | 19 52 53 | +20 48 17 | 11.711 |
| 6 | 20.09.2003 | 22 43 22 | 0.162 | 10.4 | 112.5 | 104.4 | 4 37 03 | +49 39 45 | 65.426 | 6.549 | 4 38 37 | +49 33 00 | 64.478 |
| 7 | 21.09.2003 | 20 27 21 | >0.526 | >17.3 | >110.0 | 96.7 | 18 04 39 | +69 45 05 | 33.439 | 1.051 | 17 52 10 | +69 40 32 | 31.544 |
| 8 | 21.09.2003 | 20 28 16 | >1.313 | >27.9 | 92.0 | 76.8 | 0 47 55 | +01 33 17 | 21.038 | 0.226 | 0 56 34 | -02 58 30 | 17.865 |
| 9 | 21.09.2003 | 20 48 46 | >0.322 | >13.3 | 104.4 | <91.2 | 23 33 38 | +34 43 09 | 38.097 | 3.170 | 23 34 21 | +34 21 53 | 36.444 |
| 10 | 21.09.2003 | 21 05 53 | >0.321 | >18.8 | 114.2 | 101.5 | 4 11 52 | +55 53 00 | 60.164 | 1.514 | 4 14 25 | +55 42 33 | 59.132 |
| 11 | 21.09.2003 | 22 10 52 | >0.403 | >20.3 | >100.1 | 90.5 | 8 21 02 | +56 01 52 | 55.901 | 0.152 | 8 24 05 | +55 27 57 | 54.787 |
| 12 | 21.09.2003 | 22 17 26 | >0.325 | >15.7 | 99.5 | <86.1 | 2 56 22 | +77 18 13 | 48.495 | 0.744 | 3 02 36 | +77 33 47 | 47.206 |
| 13 | 21.09.2003 | 22 17 34 | >1.091 | >59.3 | >131.7 | <76.1 | 22 54 36 | +67 36 36 | 40.626 | 1.065 | 22 51 43 | +67 54 04 | 39.086 |
| 14 | 21.09.2003 | 22 17 58 | 0.199 | 13.3 | 107.1 | 98.1 | 4 59 40 | +39 45 34 | 68.880 | 8.653 | 5 01 04 | +39 33 23 | 67.980 |
| 15 | 21.09.2003 | 22 23 42 | 0.324 | 21.4 | 115.0 | 102.1 | 6 31 17 | +52 22 11 | 64.036 | 1.365 | 6 33 34 | +52 06 34 | 63.068 |
| 16 | 21.09.2003 | 23 06 10 | 0.197 | 11.1 | 108.4 | 103.9 | 5 02 48 | +02 09 26 | 54.744 | 2.016 | 5 04 43 | +01 29 39 | 53.607 |
| 17 | 21.09.2003 | 23 06 49 | 0.101 | 3.7 | 94.6 | 89.5 | 2 39 39 | +59 53 35 | 45.543 | 0.438 | 2 41 25 | +60 00 22 | 44.167 |
| 18 | 22.09.2003 | 19 00 39 | >1.165 | >16.6 | 86.7 | <81.7 | 16 55 27 | +00 08 40 | 12.937 | 0.155 | 15 48 11 | -21 08 28 | 6.617 |
| 19 | 22.09.2003 | 19 06 54 | >0.278 | >9.7 | 94.7 | 89.5 | 0 52 51 | +13 39 03 | 31.050 | 1.028 | 0 58 17 | +11 58 15 | 28.995 |
| 20 | 22.09.2003 | 19 28 03 | 0.240 | 8.0 | 93.9 | 87.2 | 18 52 47 | +79 28 42 | 31.759 | 2.579 | 18 33 01 | +80 07 41 | 29.752 |
| 21 | 22.09.2003 | 19 35 35 | >0.638 | >13.8 | 95.8 | 86.1 | 22 54 10 | +08 08 21 | 20.240 | 0.770 | 22 58 55 | +04 06 23 | 16.918 |
| 22 | 22.09.2003 | 19 43 05 | >0.248 | >15.6 | 104.6 | <97.2 | 3 51 00 | +44 09 16 | 63.806 | 1.345 | 3 53 03 | +43 50 09 | 62.833 |
| 23 | 22.09.2003 | 19 57 23 | 0.524 | 12.1 | 98.0 | 91.3 | 0 24 14 | +05 18 59 | 22.910 | 0.419 | 0 31 20 | +01 53 05 | 20.038 |
| 24 | 22.09.2003 | 19 57 48 | 0.718 | 13.6 | 87.3 | 79.2 | 22 41 03 | -02 57 36 | 17.374 | 0.455 | 22 44 58 | -10 27 54 | 13.352 |
| 25 | 22.09.2003 | 19 58 45 | >0.400 | >28.0 | >114.2 | 99.2 | 4 35 18 | +41 20 48 | 65.625 | 1.133 | 4 37 14 | +40 59 06 | 64.681 |
| 26 | 22.09.2003 | 20 02 42 | 0.398 | 26.3 | 116.1 | 102.7 | 3 58 29 | +40 07 54 | 66.970 | 2.798 | 4 00 14 | +39 49 60 | 66.045 |
| 27 | 22.09.2003 | 20 34 29 | 0.123 | 7.5 | 104.0 | 98.5 | 4 24 41 | +54 58 26 | 64.855 | 2.433 | 4 26 57 | +54 45 57 | 63.898 |
| 28 | 22.09.2003 | 20 49 49 | >0.561 | >08.9 | 85.8 | 79.1 | 21 54 25 | +06 36 04 | 16.932 | 0.175 | 21 47 56 | +00 04 32 | 12.771 |
| 29 | 22.09.2003 | 21 07 41 | >0.436 | >32.0 | 116.7 | 103.9 | 5 08 11 | +29 12 54 | 73.390 | 6.716 | 5 09 34 | +28 54 06 | 72.547 |
| 30 | 22.09.2003 | 21 21 20 | 0.320 | 8.1 | 88.8 | 82.2 | 0 05 37 | +08 19 17 | 25.361 | 1.617 | 0 07 04 | +05 58 53 | 22.796 |
| 31 | 22.09.2003 | 21 23 59 | 0.602 | 12.4 | 97.8 | 85.8 | 23 02 32 | +21 55 39 | 20.093 | 0.536 | 23 00 39 | +19 17 38 | 16.743 |
| 32 | 22.09.2003 | 21 30 41 | 0.322 | 13.5 | 101.7 | 90.0 | 1 43 05 | +76 31 20 | 43.860 | 1.397 | 1 49 02 | +76 52 44 | 42.432 |
| 33 | 22.09.2003 | 21 39 11 | >1.366 | >26.0 | 101.5 | 82.4 | 21 36 18 | +14 27 49 | 17.570 | 0.145 | 21 24 29 | +09 19 44 | 13.615 |
| 34 | 22.09.2003 | 22 21 54 | >0.202 | >4.2 | 92.1 | <91.0 | 18 51 36 | +14 55 07 | 14.868 | 0.722 | 18 05 17 | +01 29 56 | 9.880 |
| 35 | 22.09.2003 | 22 22 58 | 0.284 | 11.6 | 106.0 | 96.5 | 19 15 19 | +85 01 30 | 36.267 | 0.850 | 18 28 59 | +85 01 14 | 34.526 |

Закінчення табл. 3

| № п/п | Дата | Час | Δt , с | L , км | H_p , км | H_e , км | α_{Rinf} | δ_{Rinf} | v_{inf} , км/с | σ_v , км/с | α_{RG} | δ_{RG} | v_G , км/с |
|-------|------------|----------|----------------|----------|------------|------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|
| 36 | 22.09.2003 | 22 25 17 | >0.882 | >20.4 | 100.0 | 86.0 | 23 33 32 | +01 36 30 | 22.078 | 0.157 | 23 30 11 | -02 11 36 | 19.081 |
| 37 | 22.09.2003 | 22 43 17 | >0.364 | >8.0 | 98.3 | <92.1 | 18 16 22 | +62 10 04 | 22.156 | 0.297 | 17 50 44 | +59 45 49 | 19.171 |
| 38 | 22.09.2003 | 22 44 04 | >0.401 | >27.4 | 117.1 | <99.3 | 6 10 52 | +47 58 40 | 66.128 | 2.624 | 6 12 44 | +47 45 52 | 65.191 |
| 39 | 22.09.2003 | 22 48 54 | 0.165 | 10.3 | 112.8 | 104.4 | 4 50 43 | +30 06 41 | 66.933 | 4.628 | 4 51 55 | +29 52 27 | 66.007 |
| 40 | 22.09.2003 | 22 55 28 | >0.640 | >7.5 | 85.4 | 78.0 | 1 18 09 | +44 32 26 | 17.983 | 0.436 | 1 19 41 | +43 54 01 | 14.204 |
| 41 | 22.09.2003 | 22 59 33 | 0.487 | 20.9 | 110.6 | 91.7 | 0 10 55 | +72 14 04 | 50.500 | 1.426 | 0 09 23 | +72 29 48 | 49.266 |
| 42 | 22.09.2003 | 23 01 07 | 0.164 | 10.4 | 110.5 | 102.5 | 5 36 24 | +52 50 55 | 60.488 | 4.965 | 5 38 33 | +52 42 02 | 59.462 |
| 43 | 23.09.2003 | 18 09 37 | >1.637 | >22.7 | 91.8 | 74.9 | 20 14 34 | +03 29 18 | 13.172 | 0.825 | 20 13 11 | -11 15 37 | 7.072 |
| 44 | 23.09.2003 | 18 44 40 | >0.475 | >15.0 | 102.3 | 96.4 | 0 58 49 | +03 24 50 | 30.996 | 0.678 | 1 05 19 | +01 15 10 | 28.940 |
| 45 | 23.09.2003 | 19 27 51 | >0.558 | >17.5 | 106.9 | 92.3 | 23 11 31 | +22 20 05 | 27.551 | 0.427 | 23 14 31 | +20 59 22 | 25.216 |
| 46 | 23.09.2003 | 19 46 12 | >0.321 | >19.4 | >114.2 | 104.9 | 5 13 16 | +51 55 15 | 59.046 | 6.951 | 5 15 59 | +51 28 34 | 57.995 |
| 47 | 23.09.2003 | 19 51 58 | 0.526 | 16.0 | 104.7 | 90.3 | 19 28 37 | +74 31 43 | 31.631 | 1.184 | 19 16 10 | +75 04 03 | 29.619 |
| 48 | 23.09.2003 | 20 03 26 | >0.201 | >9.0 | 106.3 | <99.2 | 2 51 39 | +78 06 60 | 43.578 | 2.981 | 3 04 11 | +78 10 14 | 42.141 |
| 49 | 23.09.2003 | 20 09 42 | >0.279 | >5.6 | 94.1 | 88.0 | 21 41 40 | +30 26 52 | 20.463 | 1.900 | 21 39 06 | +28 41 49 | 17.185 |
| 50 | 23.09.2003 | 20 12 20 | >0.874 | >18.7 | >96.0 | 93.1 | 0 04 44 | -27 52 57 | 22.389 | 0.438 | 0 14 05 | -34 28 45 | 19.439 |
| 51 | 23.09.2003 | 20 14 30 | 0.238 | 7.7 | 104.6 | 100.0 | 0 49 02 | +09 47 30 | 39.174 | 5.020 | 0 51 15 | +08 49 08 | 37.568 |
| 52 | 23.09.2003 | 20 28 22 | 0.363 | 15.5 | 106.6 | 94.6 | 0 56 57 | +13 47 10 | 34.414 | 0.608 | 0 59 41 | +12 38 27 | 32.575 |
| 53 | 23.09.2003 | 20 34 16 | >0.241 | >4.7 | 85.9 | 80.9 | 21 27 43 | +19 20 32 | 12.373 | 0.742 | 21 06 56 | +06 30 43 | 5.429 |
| 54 | 23.09.2003 | 20 35 58 | >0.236 | >16.2 | 114.4 | 114.5 | 5 33 56 | +09 08 45 | 68.216 | 0.842 | 5 35 53 | +08 32 37 | 67.308 |
| 55 | 23.09.2003 | 20 42 39 | 0.365 | 18.3 | 99.6 | 86.6 | 5 32 56 | +79 10 25 | 50.786 | 0.727 | 5 43 37 | +78 57 32 | 49.557 |
| 56 | 23.09.2003 | 20 48 36 | >0.600 | >12.4 | 92.7 | <84.6 | 22 49 46 | +03 08 18 | 20.260 | 0.153 | 22 49 06 | -01 18 42 | 16.942 |
| 57 | 23.09.2003 | 20 51 30 | >0.478 | >25.0 | >108.3 | 97.7 | 5 40 28 | +43 15 35 | 50.432 | 0.990 | 5 43 50 | +42 38 12 | 49.195 |
| 58 | 23.09.2003 | 20 55 52 | >0.471 | >28.2 | <113.7 | >118.4 | 5 36 06 | -06 02 46 | 62.175 | 1.980 | 5 38 57 | -06 52 35 | 61.178 |
| 59 | 23.09.2003 | 20 58 22 | >0.208 | >13.2 | >98.6 | 94.2 | 4 59 58 | +25 36 57 | 64.279 | 2.771 | 5 01 47 | +25 10 53 | 63.312 |
| 60 | 23.09.2003 | 21 01 30 | >0.993 | >31.8 | 103.2 | 81.0 | 1 21 27 | +13 00 34 | 28.282 | 0.652 | 1 25 22 | +11 14 30 | 26.012 |
| 61 | 23.09.2003 | 21 12 55 | 0.280 | 8.3 | 105.9 | 99.0 | 18 09 20 | +82 04 18 | 31.171 | 1.839 | 17 29 32 | +81 59 44 | 29.128 |
| 62 | 23.09.2003 | 21 39 59 | 0.639 | 20.5 | 107.8 | 90.7 | 0 11 54 | +14 29 05 | 33.430 | 0.484 | 0 12 20 | +13 24 37 | 31.534 |
| 63 | 23.09.2003 | 21 55 29 | 0.364 | 9.3 | 100.2 | 92.0 | 21 57 34 | +56 47 47 | 32.027 | 1.469 | 21 52 50 | +56 51 05 | 30.040 |
| 64 | 23.09.2003 | 22 19 09 | 0.204 | 12.6 | 112.3 | 106.8 | 8 25 22 | +52 13 44 | 58.360 | 2.703 | 8 28 05 | +51 41 49 | 57.295 |
| 65 | 23.09.2003 | 22 39 34 | 0.205 | 13.2 | 111.6 | 102.3 | 5 55 52 | +53 41 20 | 69.467 | 1.700 | 5 57 41 | +53 32 40 | 68.575 |
| 66 | 23.09.2003 | 22 48 50 | >0.162 | >9.3 | >105.2 | 97.3 | 3 21 45 | +32 09 11 | 56.690 | 1.815 | 3 22 48 | +31 55 45 | 55.593 |
| 67 | 23.09.2003 | 23 04 35 | >0.642 | >11.2 | 82.9 | 70.8 | 0 44 23 | +24 58 15 | 14.341 | 2.104 | 0 39 26 | +19 09 33 | 9.055 |
| 68 | 23.09.2003 | 23 20 04 | 0.281 | 13.4 | 109.0 | 97.6 | 3 49 50 | +79 41 05 | 45.391 | 1.298 | 3 57 49 | +80 02 34 | 44.013 |
| 69 | 23.09.2003 | 23 23 12 | 0.123 | 10.6 | 115.3 | 106.5 | 4 40 00 | +37 58 04 | 87.229 | 6.303 | 4 40 36 | +37 52 57 | 86.521 |
| 70 | 23.09.2003 | 23 45 48 | 0.881 | 21.7 | 98.0 | 87.9 | 16 01 42 | +62 41 22 | 24.836 | 0.223 | 15 50 12 | +58 54 47 | 22.214 |
| 71 | 23.09.2003 | 23 57 54 | >0.201 | >8.6 | 99.2 | 90.9 | 1 08 46 | +14 31 37 | 38.428 | 6.149 | 1 07 47 | +13 42 26 | 36.788 |
| 72 | 24.09.2003 | 0 00 10 | 0.442 | 12.0 | 98.9 | 90.2 | 0 43 35 | +10 01 25 | 27.003 | 0.722 | 0 40 36 | +08 00 50 | 24.613 |
| 73 | 24.09.2003 | 0 00 25 | 0.241 | 17.1 | 104.0 | 88.0 | 3 10 42 | +32 22 04 | 64.174 | 5.203 | 3 11 03 | +32 13 33 | 63.206 |
| 74 | 24.09.2003 | 0 03 07 | 0.159 | 10.1 | 93.8 | 77.4 | 1 09 05 | +52 01 39 | 47.583 | 6.524 | 1 08 08 | +52 02 17 | 46.268 |
| 75 | 24.09.2003 | 0 04 35 | 0.361 | 5.9 | 86.4 | 83.4 | 15 46 06 | +69 36 27 | 16.217 | 0.625 | 15 22 55 | +59 41 35 | 11.807 |
| 76 | 24.09.2003 | 0 06 42 | >0.592 | >15.1 | 87.1 | <77.4 | 23 29 15 | +08 36 33 | 24.029 | 0.443 | 23 21 45 | +05 36 50 | 21.304 |
| 77 | 24.09.2003 | 0 16 48 | >0.120 | >14.6 | 114.6 | 101.0 | 4 05 33 | +36 51 22 | 103.821 | 9.816 | 4 05 46 | +36 48 39 | 103.227 |
| 78 | 24.09.2003 | 0 23 38 | >0.119 | >4.3 | 108.9 | <105.2 | 4 46 49 | +15 34 18 | 43.007 | 6.065 | 4 48 27 | +14 53 18 | 41.551 |
| 79 | 24.09.2003 | 0 35 37 | 0.123 | 7.4 | 100.0 | 93.4 | 5 44 54 | +34 15 21 | 63.750 | 2.166 | 5 45 57 | +34 04 17 | 62.775 |
| 80 | 24.09.2003 | 0 51 00 | 0.121 | 7.3 | 110.0 | 104.1 | 3 59 07 | +15 18 25 | 58.974 | 1.464 | 3 59 30 | +14 58 41 | 57.921 |

жину метеора L , мінімальні висоти появи H_b та максимальні висоти зникнення H_e , координати радіанта метеора α_{Rinf} , δ_{Rinf} та його швидкість на нескінченності v_{inf} , середні квадратичні похибки швидкостей σ_v , координати та швидкості геоцентричних радіантів α_{RG} , δ_{RG} , v_G , виправлені за гравітаційний вплив Землі. Визначення швидкості за кожним з пунктів [5, 11] базувалося на лінійній апроксимації пройденого метеором видимого з даного пункту шляху від часу, в результаті чого отримувалися середні значення швидкості та її дисперсія. Табличні значення швидкості визначалися як середні за обома пунктами, а дисперсія — як сума дисперсій, якщо якість зображень в обох пунктів за табл. 2 була непоганою. У випадку суттєвих недоліків якості зображень у одному із пунктів швидкості та її похибки бралися з іншого пункту без усереднення.

Знаками «>» або «<» позначено ті метеори, які не поміщаються повністю в кадр. На рис. 2 показано розподіли метеорів по значеннях часу життя τ та довжини L його траєкторії окремо для кожного пункту за даними табл. 3. Через те що для пункту А, де камеру направлено в зеніт, атмосферний об'єм світіння метеорів менший, максимуми відповідних розподілів зміщені у бік менших значень. Одне з великих значень $L > 60$ км у пункті А не увійшло в таблицю через великі похибки обчислень, тому найдовший метеор ($L > 59.3$ км) існував більше секунди. Кількість же коротких в часі метеорів згідно з табл. 3 була досить великою: 32, або 40 % від загальної кількості для $\tau < 0.5$ с, 20 (25 %) для $\tau < 0.3$ с та 12 (15 %) для $\tau < 0.2$ с.

Розподіли по висотах появи та зникнення не приведені, однак з розгляду табл. 3 видно, що висоти появи і зникнення через короткі метеорні траєкторії лежать приблизно в тих же межах: 90—130 км та 80—120 км відповідно.

Унікальними, з першого погляду, є метеори № 54 та № 58, де висоти появи метеорів менші за висоти зникнення, тобто метеори рухаються вгору. При цьому метеор № 54 рухається практично горизонтально — зміна висоти складає 0.1 км (похибка визначення дальності до метеора та висоти складає порядку 0.1—0.3 км), а метеор

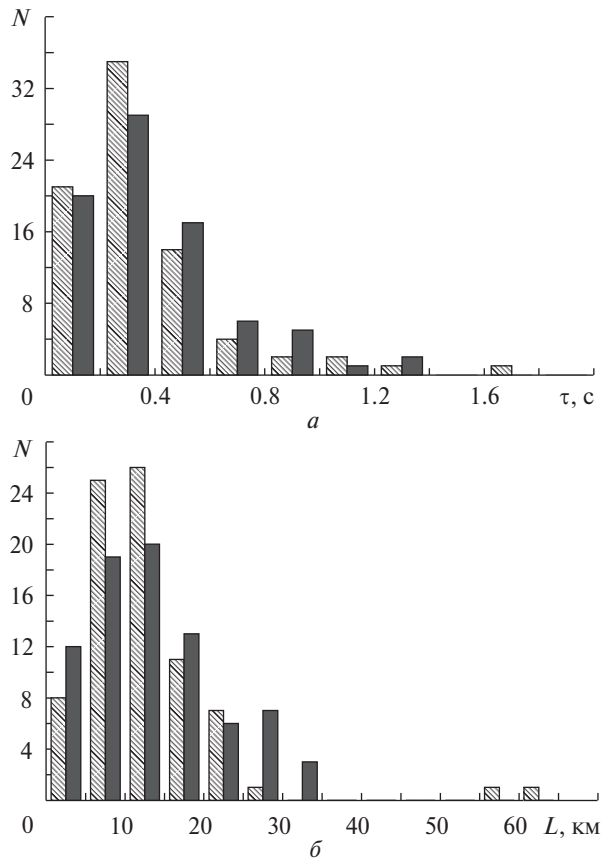


Рис. 2. Розподіл метеорів: а — по значеннях часу життя τ , б — по значеннях видимих довжин L траєкторій (світла штриховка — пункт А, темна — В)

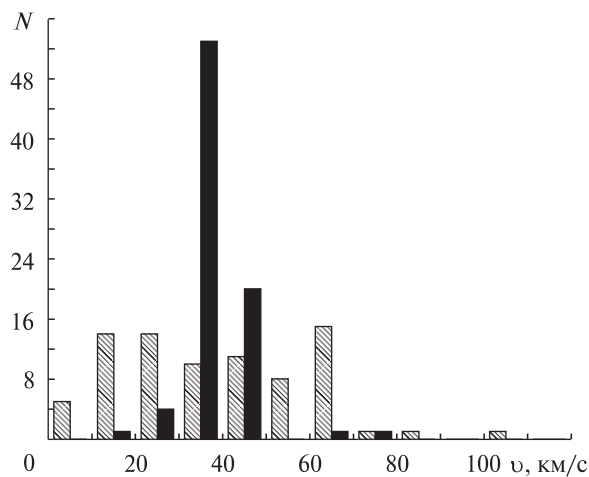


Рис. 3. Розподіли метеорів по значеннях геоцентричних швидкостей (світла штриховка) та по значеннях геліоцентричних швидкостей (темна)

№ 58 піднімається вгору більше ніж на 5 км при довжині траєкторії $L > 28.2$ км. Однак методика визначення траєкторії метеора [4] враховує кривизну земного сфероїда, і з розгляду геометрії польоту даного метеора стає зрозумілим, що він влітає в обидва поля зору та вилітає з них після перетину ним найкоротшої відстані до земної поверхні — початкова видима зенітна відстань радіанта складає $Z_R \approx 99^\circ$. Тим не менш, даний метеор заслуговує на детальніший розгляд з міркувань фізики метеороного явища.

На рис. 3 наведено розподіли геоцентричних та геліоцентричних швидкостей. Видно, що розподіл геоцентричних швидкостей бімодальний з модами $v_{G1} \sim 20$ км/с та $v_{G2} \sim 57$ км/с. Враховуючи малу точність цих обчислень, можна вважати, що вони не суперечать даним радіоспостережень [1]: $v_{G1} = 32$ км/с та $v_{G2} = 54$ км/с.

ГЕЛІОЦЕНТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТЕОРІВ: ГЕЛІОЦЕНТРИЧНІ ВЕКТОРИ ШВИДКОСТЕЙ ТА ЕЛЕМЕНТИ ОРБИТИ

У табл. 4 наведено геліоцентричні кінематичні параметри метеорів: координати радіанта метеора α_H , δ_H та його геліоцентрична швидкість v_H , велика піввісь a та обернена величина $1/a$, пропорційна енергії метеора, ексцентриситет e , нахил i , довгота висхідного вузла Ω та аргумент перигелію ω .

Класичною проблемою при аналізі орбіт метеорів є пошук гіперболічних метеорів та можливості їхнього походження за межами Сонячної системи. Як видно з табл. 4 та рис. 4, a , кількість гіперболічних орбіт ($a < 0$, $e > 1$) складає 11 (14%). Основним фактором, що визначає точність оцінки великої півосі, а відтак і ексцентриситету, є похибка визначення геоцентричної, а далі і ге-

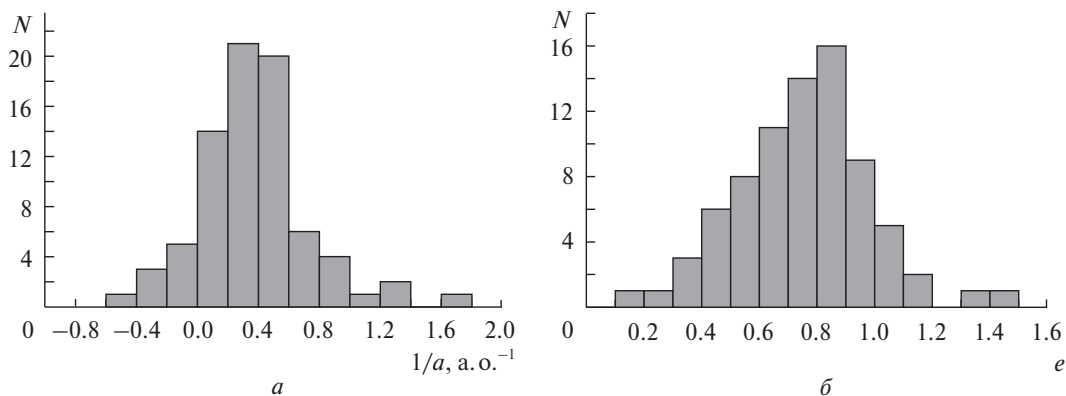


Рис. 4. Розподіл метеорів по значеннях величини $1/a$ (а) та ексцентриситетів орбіт e (б)

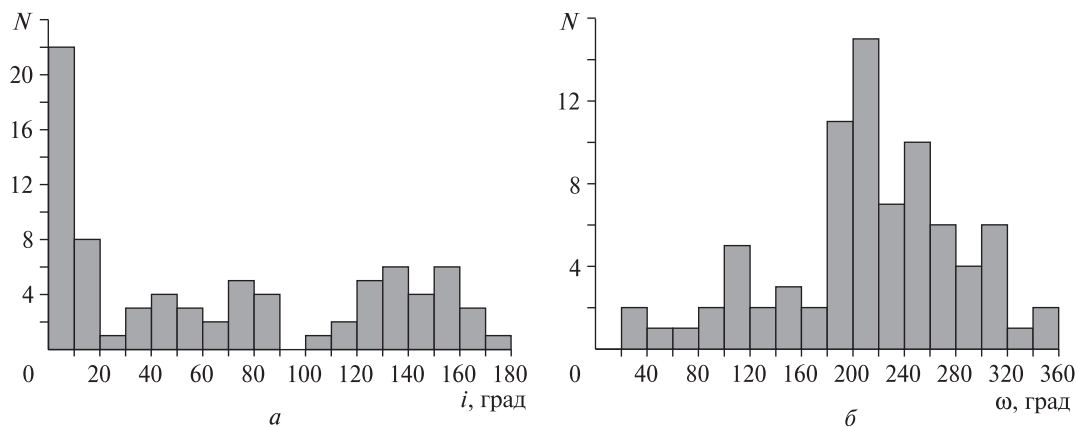


Рис. 5. Розподіл метеорів по значеннях нахилу i їхніх орбіт (а) та аргумента перигелію ω (б)

Таблиця 4. Геоцентричні радіанти, модулі швидкостей та елементи орбіти метеорів

| Номер | α_H | δ_H | v_H , км/с | $1/a$, а. о. ⁻¹ | a , а. о. | e | i , град | Ω , град | ω , град |
|-------|---|------------|--------------|-----------------------------|-------------|----------|------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 19 ^h 50 ^m 26 ^s | +04°59'45" | 35.189 | 0.588880 | 1.698140 | 0.619650 | 30.12 | 176.213576 | 266.47 |
| 2 | 20 36 24 | +24 04 24 | 38.810 | 0.286912 | 3.485390 | 0.829004 | 55.60 | 176.262944 | 264.34 |
| 3 | 20 21 01 | -25 25 14 | 36.825 | 0.456136 | 2.192329 | 0.725552 | 7.06 | 356.269083 | 87.60 |
| 4 | 14 09 41 | +39 20 10 | 40.152 | 0.167494 | 5.970379 | 0.904880 | 77.15 | 176.292875 | 94.66 |
| 5 | 18 26 35 | -11 37 50 | 37.888 | 0.367219 | 2.723174 | 0.642274 | 11.81 | 177.215634 | 203.70 |
| 6 | 2 44 47 | +63 56 12 | 41.486 | 0.045375 | 22.038742 | 0.958526 | 131.96 | 177.321525 | 215.83 |
| 7 | 17 55 33 | +24 57 25 | 42.125 | -0.014254 | -70.155547 | 1.014354 | 48.39 | 178.202028 | 180.37 |
| 8 | 20 26 02 | -24 06 15 | 31.180 | 0.890144 | 1.123413 | 0.575348 | 5.78 | 358.210388 | 116.16 |
| 9 | 20 55 58 | +11 38 44 | 43.418 | -0.138983 | -7.195109 | 1.074148 | 40.51 | 178.216397 | 264.72 |
| 10 | 0 40 53 | +68 22 14 | 39.854 | 0.195583 | 5.112912 | 0.829578 | 118.06 | 178.229417 | 225.34 |
| 11 | 12 25 57 | +60 40 54 | 38.222 | 0.339292 | 2.947317 | 0.756545 | 108.89 | 178.273751 | 109.43 |
| 12 | 19 15 01 | +58 24 51 | 40.255 | 0.159403 | 6.273400 | 0.844652 | 83.53 | 178.277781 | 201.63 |
| 13 | 19 34 03 | +35 20 59 | 42.186 | -0.020056 | -49.860972 | 1.017897 | 61.70 | 178.277460 | 219.27 |
| 14 | 4 04 00 | +49 34 43 | 41.357 | 0.058027 | 17.233475 | 0.946601 | 150.39 | 178.280044 | 214.63 |
| 15 | 7 53 22 | +71 38 56 | 40.000 | 0.182509 | 5.479193 | 0.821986 | 129.50 | 178.283040 | 158.49 |
| 16 | 4 13 05 | -20 32 56 | 29.656 | 0.994721 | 1.005307 | 0.402461 | 134.34 | 358.310090 | 113.95 |
| 17 | 21 27 41 | +51 34 26 | 33.756 | 0.701616 | 1.425280 | 0.552906 | 88.32 | 178.311611 | 271.80 |
| 18 | 17 37 08 | -23 32 36 | 35.544 | 0.562484 | 1.777827 | 0.439100 | 0.21 | 359.269996 | 345.53 |
| 19 | 21 35 33 | -09 38 35 | 34.610 | 0.636350 | 1.571462 | 0.833216 | 7.51 | 179.119072 | 308.86 |
| 20 | 18 06 04 | +28 26 46 | 36.740 | 0.465071 | 2.150210 | 0.532513 | 51.91 | 179.137286 | 185.36 |
| 21 | 19 49 28 | -16 32 40 | 37.224 | 0.424701 | 2.354596 | 0.682823 | 4.98 | 179.135771 | 248.68 |
| 22 | 1 40 59 | +50 06 46 | 41.322 | 0.061882 | 16.159863 | 0.958509 | 133.49 | 179.148629 | 251.49 |
| 23 | 20 36 40 | -19 25 38 | 33.530 | 0.719341 | 1.390162 | 0.645695 | 1.03 | 359.195209 | 107.53 |
| 24 | 19 27 04 | -22 47 27 | 36.753 | 0.464029 | 2.155036 | 0.611966 | 0.91 | 359.200808 | 56.32 |
| 25 | 3 06 42 | +50 23 04 | 39.736 | 0.206812 | 4.835318 | 0.833589 | 144.73 | 179.159692 | 236.05 |
| 26 | 2 13 07 | +45 03 05 | 43.086 | -0.105995 | -9.434404 | 1.071849 | 142.52 | 179.162321 | 248.37 |
| 27 | 1 36 59 | +68 13 52 | 43.481 | -0.144498 | -6.920533 | 1.130458 | 123.00 | 179.183654 | 216.34 |
| 28 | 19 10 27 | -18 11 38 | 37.775 | 0.378128 | 2.644610 | 0.662856 | 4.43 | 179.183209 | 224.52 |
| 29 | 4 32 05 | +31 49 44 | 44.087 | -0.204315 | -4.894401 | 1.188050 | 169.69 | 179.210553 | 212.64 |
| 30 | 20 42 45 | -15 05 07 | 36.258 | 0.504786 | 1.981038 | 0.743253 | 3.92 | 179.202086 | 279.25 |
| 31 | 19 45 02 | -10 12 07 | 35.454 | 0.569766 | 1.755106 | 0.587900 | 12.17 | 179.212840 | 256.14 |
| 32 | 19 23 40 | +50 21 56 | 38.321 | 0.331310 | 3.018319 | 0.688357 | 75.89 | 179.221362 | 212.96 |
| 33 | 19 06 21 | -14 28 02 | 38.446 | 0.320541 | 3.119730 | 0.709943 | 8.41 | 179.221015 | 220.86 |
| 34 | 18 02 32 | -17 17 15 | 38.878 | 0.282876 | 3.535114 | 0.715419 | 6.15 | 179.246747 | 183.23 |
| 35 | 18 04 15 | +36 46 03 | 37.729 | 0.382111 | 2.617043 | 0.615561 | 60.22 | 179.256746 | 183.21 |
| 36 | 20 10 52 | -19 32 56 | 37.482 | 0.403032 | 2.481192 | 0.726862 | 0.56 | 179.149993 | 257.19 |
| 37 | 17 58 46 | +07 20 20 | 37.197 | 0.427036 | 2.341721 | 0.570126 | 30.78 | 179.269372 | 180.88 |
| 38 | 6 30 57 | +65 26 30 | 40.080 | 0.175881 | 5.685648 | 0.823780 | 137.77 | 179.273028 | 171.70 |
| 39 | 3 53 22 | +33 07 18 | 38.553 | 0.311257 | 3.212777 | 0.754024 | 166.05 | 179.279632 | 240.01 |
| 40 | 19 29 48 | -04 21 60 | 25.782 | 1.237439 | 0.808121 | 0.452300 | 18.81 | 179.276276 | 323.06 |
| 41 | 19 57 33 | +49 00 12 | 46.603 | -0.461455 | -2.167059 | 1.422742 | 76.54 | 179.282106 | 212.14 |

| Номер | α_H | δ_H | v_H , км/с | $1/a$, а. о. ⁻¹ | a , а. о. | e | i , град | Ω , град | ω , град |
|-------|------------|------------|--------------|-----------------------------|-------------|----------|------------|-----------------|-----------------|
| 42 | 4 30 15 | +75 15 40 | 36.696 | 0.468757 | 2.133301 | 0.533560 | 127.16 | 179.284330 | 194.81 |
| 43 | 18 30 25 | -21 35 29 | 35.855 | 0.538145 | 1.858235 | 0.471060 | 1.67 | 180.043945 | 202.04 |
| 44 | 21 44 11 | -18 05 39 | 35.998 | 0.526521 | 1.899260 | 0.839145 | 6.87 | 0.088841 | 121.76 |
| 45 | 20 26 32 | -04 00 09 | 39.837 | 0.198376 | 5.040921 | 0.875944 | 18.43 | 180.111989 | 259.10 |
| 46 | 3 09 50 | +71 37 56 | 35.361 | 0.577790 | 1.730733 | 0.461578 | 127.16 | 180.126920 | 220.05 |
| 47 | 18 20 46 | +25 54 12 | 38.469 | 0.319137 | 3.133450 | 0.681354 | 49.43 | 180.129763 | 191.32 |
| 48 | 19 10 07 | +53 09 29 | 36.778 | 0.462562 | 2.161870 | 0.555726 | 77.87 | 180.138037 | 209.28 |
| 49 | 19 19 19 | -05 19 28 | 38.374 | 0.327389 | 3.054466 | 0.715236 | 17.77 | 180.140184 | 227.59 |
| 50 | 20 09 27 | -36 16 25 | 38.566 | 0.310704 | 3.218492 | 0.754757 | 17.52 | 0.146609 | 60.10 |
| 51 | 22 10 49 | -08 18 20 | 41.906 | 0.007775 | 128.610699 | 0.998214 | 5.76 | 180.138396 | 303.03 |
| 52 | 21 54 51 | -07 16 21 | 37.004 | 0.443796 | 2.253287 | 0.896149 | 9.59 | 180.150648 | 308.61 |
| 53 | 18 33 42 | -19 41 39 | 33.226 | 0.742865 | 1.346139 | 0.284286 | 3.55 | 180.146429 | 216.18 |
| 54 | 5 15 34 | -02 36 59 | 39.730 | 0.207991 | 4.807889 | 0.799635 | 153.88 | 0.158828 | 25.35 |
| 55 | 18 17 12 | +64 09 51 | 40.917 | 0.100124 | 9.987592 | 0.899349 | 87.66 | 180.164983 | 183.94 |
| 56 | 19 49 35 | -18 29 02 | 38.484 | 0.317899 | 3.145652 | 0.750752 | 2.80 | 180.152156 | 241.02 |
| 57 | 4 40 13 | +66 21 09 | 23.481 | 1.365806 | 0.732168 | 0.396058 | 135.80 | 180.171928 | 347.45 |
| 58 | 5 17 30 | -29 30 30 | 38.854 | 0.285581 | 3.501633 | 0.721631 | 126.60 | 0.173425 | 22.33 |
| 59 | 4 07 35 | +25 18 48 | 35.376 | 0.576669 | 1.734096 | 0.572231 | 175.23 | 180.186078 | 253.89 |
| 60 | 21 34 42 | -12 32 09 | 31.062 | 0.899692 | 1.111492 | 0.786717 | 2.86 | 180.160664 | 317.42 |
| 61 | 18 00 58 | +28 34 34 | 35.606 | 0.558271 | 1.791245 | 0.438171 | 52.02 | 180.185026 | 180.32 |
| 62 | 21 22 56 | -06 20 55 | 40.691 | 0.120914 | 8.270321 | 0.951829 | 13.41 | 180.200190 | 283.82 |
| 63 | 19 28 47 | +18 58 60 | 41.005 | 0.092043 | 10.864544 | 0.919536 | 43.76 | 180.213812 | 223.46 |
| 64 | 11 47 45 | +57 59 43 | 39.091 | 0.264832 | 3.775978 | 0.816509 | 115.48 | 180.231581 | 107.88 |
| 65 | 5 41 10 | +72 38 52 | 45.410 | -0.337051 | -2.966906 | 1.338974 | 130.73 | 180.246011 | 182.73 |
| 66 | 1 07 24 | +28 49 31 | 36.480 | 0.487281 | 2.052204 | 0.884576 | 140.97 | 180.252814 | 308.98 |
| 67 | 19 18 03 | -17 54 40 | 28.748 | 1.055811 | 0.947140 | 0.319065 | 4.51 | 180.246908 | 299.01 |
| 68 | 18 49 57 | +56 05 50 | 37.997 | 0.359892 | 2.778615 | 0.644461 | 80.14 | 180.272539 | 197.59 |
| 69 | 3 48 29 | +43 10 25 | 60.383 | -2.122607 | -0.471119 | 2.902111 | 155.22 | 180.277592 | 211.49 |
| 70 | 17 26 32 | +10 56 06 | 38.014 | 0.358479 | 2.789566 | 0.649166 | 34.51 | 180.288456 | 158.46 |
| 71 | 22 17 04 | -04 33 58 | 38.884 | 0.283032 | 3.533166 | 0.950487 | 12.88 | 180.292805 | 314.06 |
| 72 | 21 08 30 | -13 57 11 | 34.759 | 0.625487 | 1.598755 | 0.754423 | 3.36 | 180.277427 | 294.75 |
| 73 | 1 14 23 | +29 30 04 | 44.457 | -0.240484 | -4.158279 | 1.082253 | 142.58 | 180.302094 | 285.67 |
| 74 | 21 43 39 | +36 10 07 | 41.794 | 0.018405 | 54.334482 | 0.989776 | 75.70 | 180.301843 | 264.30 |
| 75 | 17 38 12 | -02 53 46 | 32.046 | 0.829814 | 1.205089 | 0.192084 | 20.54 | 180.299588 | 142.96 |
| 76 | 20 20 28 | -14 30 03 | 38.854 | 0.285682 | 3.500401 | 0.811147 | 5.87 | 180.291507 | 256.49 |
| 77 | 3 13 38 | +39 32 05 | 78.609 | -4.978133 | -0.200879 | 5.172947 | 155.54 | 180.314542 | 216.81 |
| 78 | 2 40 00 | -03 48 44 | 17.101 | 1.657781 | 0.603216 | 0.878945 | 150.46 | 0.313775 | 169.30 |
| 79 | 5 23 48 | +43 05 31 | 34.186 | 0.670014 | 1.492505 | 0.344984 | 159.98 | 180.328257 | 207.28 |
| 80 | 2 25 03 | +05 02 44 | 35.894 | 0.535135 | 1.868688 | 0.851446 | 164.94 | 0.329537 | 125.07 |

ліоцентричної швидкості. Якщо умовно вважати, що геоцентрична швидкість визначена добре при похибці $\sigma_v < 1$ км/с, і дуже неякісно при $\sigma_v > 2.5$ (див. табл. 3), то для наших 80 метеорів маємо: $N(\sigma_v < 1) = 36$ (45 %) і $N(\sigma_v > 2.5) = 20$ (25 %). З рис. 4, а видно, що для $1/a < 0$ кількість гіперболічних метеорів досить повно покривається кількістю метеорів з великими похибками, і складає досить плавний хвіст загального розподілу. З цього можна зробити висновок про дуже низьку імовірність дійсно гіперболічних орбіт для метеорів, приведених на рис. 4, а.

Однак на рис. 4 не показано два метеори: № 69 ($1/a = -2.123$, $e = 2.902$) та № 77 ($1/a = -4.978$, $e = 5.173$). Їхні геоцентричні та геліоцентричні швидкості складають відповідно $v_G = 86.521$ км/с, $v_G = 103.227$ км/с, $v_H = 60.383$ км/с, $v_H = 78.609$ км/с.

За даними табл. 2 якість зображень обох метеорів складає найнижчий 1 бал, а позиційні кути є дуже малими: $\gamma_A = 31.6^\circ$, $\gamma_B = 15.7^\circ$ для № 69 та $\gamma_A = 29.2^\circ$, $\gamma_B = 3.8^\circ$ для № 77. Це призводить до надвеликих похибок у визначенні геоцентричних швидкостей ($\sigma_v = 6.3$ та 9.8 км/с відповідно) і до неможливості достовірно підтвердити належність даних метеорів до гіперболічних. Цікаво, що нахили їхніх орбіт і аргументи перигелію майже однакові ($i = 155.22^\circ$ та 155.54° , $\omega = 211.49^\circ$ та 216.81°). Це могло б свідчити про належність їх до одного слабкого метеорного потоку.

Розподіли метеорів по нахилах їхніх орбіт і аргументах перигелію приведені на рис. 5.

ВИСНОВКИ

Отримані результати спостережень свідчать, в першу чергу, про той факт, що опрацювання надслабких метеорів пов'язане з суттєвими похибками та зі значними ризиками зробити невірні висновки. З іншого боку, дослідження таких слабких метеорів може надати ряд цікавої інформації про маломасову складову метеорної речовини, не типову для яскравих метеорів. Приклад тому — два метеори, що рухаються вгору. Імовірно, частинки такої зоряної величини та маси лежать недалеко від межі, яка відділяє метеорну складову навколоземної косміч-

ної речовини від дрібнішої (або повільнішої) пилової складової, яка гальмується атмосферою Землі до досягнення нею температури плавлення [3]. А при дотичному до поверхні планети рухові такі частинки можуть перетворитися на її супутники.

Загалом наведені у роботі дані про кінематичні характеристики вересневих слабких метеорів можуть бути використані як у задачах фізики метеорів, так і в задачах динаміки та еволюції метеорних орбіт. Задача пошуку нових слабких метеорних потоків (чи підтвердження вже існуючих) на основі отриманих результатів виходить за рамки даної роботи.

1. Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989. — 294 с.
2. Козак П. М. Проблема ідентифікації зірок у кадрі при цифровій обробці телівізієвих спостережень метеорів // Вісник Астрон. школи. — 2001. — 2, № 1. — С. 21—24.
3. Козак П. М., Кручиненко В. Г., Крученицький Г. М. та ін. Трансформація спорадичної маломасової метеороїдної складової в аерозоль верхньої атмосфери Землі // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 4. — С. 13—21.
4. Козак П. Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небес. тел. — 2002. — 18, № 5. — С. 471—480.
5. Козак П. Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небес. тел. — 2003. — 19, № 1. — С. 62—76.
6. Brown P., Weryk R. J., Wong D. K., Jones J. The Canadian meteor orbit radar meteor stream catalogue // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — 102, N 1—4. — P. 209—219.
7. Fujiwara Y., Ueda M., Sugimoto M., et al. TV observations of the 1998 Giacobonid meteor shower in Japan // Proc. Int. Conf. Meteoroids 2001 / Ed. by B. Warmbein. — Kiruna (Sweden), 2001. — P. 123—127.
8. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., et al. Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev // Earth, Moon and Planets. — 1995. — 68. — P. 297—301.

9. Koten P., Spurny P., Borovicka J., Stork R. Catalogue of video meteor orbits. Part 1 // Publ. Astron. Inst. Czech Republic. — 2003. — N 91. — P. 1—32.
10. Kozak P. «Falling Star»: Software for processing of double-station TV meteor observations // Advances in Meteoroid and Meteor Science / Eds J. M. Trigo-Rodrigues, F. J. M. Rietmeijer, J. Llorca, D. Janches. — Springer, 2008. — P. 277—283.
11. Kozak P. «Falling Star»: Software for processing of double-station TV meteor observations // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — 102, N 1—4. — P. 277—283.
12. Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranukha Yu. G., et al. Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991—1993 // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія. — 1997. — Вип. 34. — С. 94—117.
13. SonotaCo A meteor shower catalog based on video observations in 2007—2008 // WGN, J. IMO. — 2009. — 37, N 2. — P. 55.
14. Svoren J., Porubcan V., Neslusan L. Current Status of the photographic meteoroid orbits database and a call for contributions to a new version // Earth, Moon, and Planets. — 2008. — 102, N 1—4. — P. 11—14.
15. Ueda M., Fujiwara Y., Sugimoto M., Kinoshita M. Results of double-station TV observations during 1998 and 1999 // Proc. Int. Conf. Meteoroids 2001 / Ed. by B. Warmbein. — Kiruna (Sweden), 2001. — P. 325—330.

Надійшла до редакції 05.05.11

*P. M. Kozak, O. O. Rozhylo, Yu. H. Taranukha,
V. H. Kruchynenko*

KINEMATICAL CHARACTERISTICS OF SEPTEMBER METEORS FROM DOUBLE-STATION TV-OBSERVATIONS IN 2003

We present some results of double-station TV-observations of meteors which were carried out at the observational stations of the Astronomical Observatory of the Kyiv Taras Shevchenko National University. The problem of accuracy determination for the calculations of kinematical parameters of meteors is analyzed. The tables for computed geocentric and heliocentric characteristics of 80 double-station meteors are given. Statistical distributions of main meteor parameters are plotted. Some obtained anomalous meteor characteristics are analyzed.

УДК 528.3

Н. І. Каблак

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МОНІТОРИНГ ОСАДЖЕНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА ОСНОВІ ОБРОБКИ ГНСС-ДАНИХ

Значення вологості зенітної затримки, які отримуються із аналізу даних GPS-спостережень, використовуються для оперативного прогнозу погоди та моделювання клімату. На їхній основі обчислюються значення осадженої водяної пари, які використовуються для потреб метеорології. Наведено оцінку значень осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних та за результатами аерологічного зондування атмосфери.

ВСТУП

На даний час інтенсивно продовжуються науково-дослідні роботи з визначення та врахування похибок, що впливають на ГНСС-спостереження у мережі активних референціальних станцій, у тому числі дослідження впливу нижньої частини атмосфери (тропосферних затримок). Похибки врахування тропосферної рефракції в GPS-вимірюваннях впливають перш за все на загальний масштаб геодезичних вимірювань, на точність визначення висоти та на горизонтальні координати пунктів спостережень. Тропосферна затримка Δr складається з двох складових: гідростатистичної затримки Δr_d , яка залежить від стану сухої складової атмосфери, і вологості затримки Δr_w , яка залежить від вологості повітря. Параметр Δr_w є основною величиною при побудові та аналізі метеорологічної моделі для прогнозування погоди.

Нижче оцінюється точність визначення інтегрованої водяної пари в атмосфері (*IWI*) на основі ГНСС-спостережень та аерологічного зондування атмосфери.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В даний час дослідження тропосфери із використанням ГНСС-спостережень направлені у

бік більш глибокого вивчення погодних і кліматичних процесів, і в кінцевому рахунку, поліпшення прогнозування погоди [2, 6, 10].

Атмосферний прогноз значною мірою залежить від даних про циркуляцію атмосфери, в якій фізичні процеси динамічного перемішування маси і енергії (а також радіаційного впливу та інших) повинні бути відомими. Атмосфера нестабільна як у вертикальному, так і горизонтальному напрямку. Динаміка тропосфери значно ускладнюється швидкими змінами фази водяної пари. Структура поля вологості досить складна і залежить від багатьох різних процесів, що відбуваються в шарах атмосфери, а отже, характеризується закономірними і випадковими змінами у просторі і часі. Великомасштабні неоднорідності поля вологості повітря доходять до тисячі метрів. Є також дрібномасштабні неоднорідності поля вологості повітря з розмірами від сотень метрів до міліметрів. Числові характеристики водяної пари використовуються в оперативній метеорології для короткострокових прогнозів погоди (відстані між станціями до 70 км) та для числового прогнозування погоди у кліматичних застосуваннях цілого регіону (відстань між станціями понад 100 км).

Оперативний прогноз погоди зазвичай базується на спостереженнях відносної вологості поряд з тиском і температурою, що визначаються за допомогою радіозондів і наземних метеоро-

логічних приладів. Радіозонди запускаються два рази на добу і визначають профілі зміни атмосферного тиску (P , мбар), температури повітря (T , °C) та відносної вологості повітря (W , %) з висотою в атмосфері. Один з головних недоліків радіозондів — це відносно низька точність датчиків в результаті забруднення їх під час запуску. З іншого боку, кількість водяної пари може бути визначена радіометром. Цей інструмент забезпечує зазвичай дуже точні дані, але його виміри ненадійні під час опадів. Крім того, даний прилад є дорогим. Радіозонди та наземні або космічні радіометри водяної пари розташовані на значних відстанях, і дискретність їхніх вимірювань низька.

Отже, при таких методах вимірювань вертикальна роздільна здатність визначення вмісту водяної пари в атмосфері достатня, але просторовий і часовий розподіл даних вимірювань дуже розріджений і залежить від погодних умов.

В кінці минулого століття був розроблений метод для оцінки та визначення інтегрованої водяної пари в атмосфері (IWV) на основі ГНСС-спостережень [5, 7]. Метод ґрунтується на оцінці тропосферної затримки $\Delta\rho$ сигналів ГНСС-супутників. Саме $\Delta\rho$ можуть бути безпосередньо пов'язані з кількістю водяної пари в атмосфері і, отже, є продуктом, що має істотне значення для метеорологів. Перевагою методу є можливість його неперервної реалізації на наявній ГНСС-інфраструктурі (мережі активних референцних станцій з єдиним центром управління), а також те, що отримані на основі ГНСС-вимірювань оцінки водяної пари не залежать від падіння дощу та наявності хмар.

Отже, використання ГНСС дозволяє проводити довготривалий регіональний і глобальний моніторинг вмісту водяної пари в атмосфері. Постійні мережі з відслідковування ГНСС-супутників стали надзвичайно цінним інструментарієм для даних науково-дослідних застосувань. У першу чергу до таких мереж можна віднести глобальну мережу IGS (International GNSS Service) та регіональну мережу EPN (EUREF Permanent Network). До числа таких мереж можна віднести також національні мережі референцних станцій, що працюють у перманентному режимі, наприклад німецька мережа GREF, а за останні

роки — і мережі активних референцних станцій, які дозволяють користувачам отримувати результати вимірювань у режимі реального часу (RTK-технології). У залежності від географічного розташування референцних ГНСС-станцій в даний час є можливість детального вивчення просторово-часового розподілу водяної пари в атмосфері. Єдиним обмеженням є те, що за допомогою використання наземних ГНСС-станцій визначаються тільки значення IWV , тобто ГНСС не дають інформації про вертикальний розподіл водяної пари в атмосфері.

На теперішній час проведена оцінка точності ГНСС- IWV -даних, досліджена доцільність ГНСС- IWV -даних для прогнозу погоди та кліматичних досліджень та вивчена можливість опрацювання ГНСС- IWV -даних в режимі реального часу [2, 6].

Затримка $\Delta\rho$ складається із двох складових: гідростатичної затримки ($\Delta\rho_d$) та вологої затримки ($\Delta\rho_w$). Значення $\Delta\rho_d$ залежить від поверхневого тиску, а для конвертування $\Delta\rho_w$ в IWV необхідна середня температура атмосфери над пунктом. Порядок даних величин: $\Delta\rho_d$ — метри, $\Delta\rho_w$ — дециметри, IWV — міліметри. Значення IWV змінюються в межах від 0 до 40 мм и вище. Похибка в 0.5 гектопаскалів відповідає 0.2 мм IWV і є допустимою при числовому прогнозі погоди. Якість результатів залежить від наявності метеовимірювань на поверхні землі.

Було проведено ряд метеопроєктів: COST-71 «Exploitation of Ground-Based GPS for Operational Numerical Weather Prediction and Climate Applications» (1998—2003 pp., <http://www.knmi.nl/samenw/cost716/index>), TOUGH «Targeting Optimal Use of GPS Humidity Measurements in Meteorology» (2003—2006 pp., <http://tough.dmi.dk>) та інші. На сьогодні найбільшим проєктом у Центральній Європі, у рамках якого проходить визначення в майже реальному часі зенітних тропосферних затримок на регіональній мережі ГНСС-станцій, є E-GVAP, а основний обчислювальний центр знаходиться у Королівській обсерваторії Бельгії (<http://egvap.dmi.dk>). Мережа містить на даний момент близько 160 станцій: більшість з них належать до перманентної мережі EPN від EUREF та Міжнародної ГНСС-служби IGS.

Розвинута інфраструктура даних мереж дозволяє використовувати ГНСС-вимірювання для потреб метеорології. Неперервність визначення водяної пари на значних територіях дозволяє визначати та прогнозувати динаміку водяної пари, а отже і опадів в реальному часі.

Закарпатська область межує із чотирма країнами, на території яких діють мережі активних референцних станцій: SKPOS (Словаччина), ГНССNET.hu (Угорщина), ROMPOS (Румунія), ASG-EUPOS (Польща). На території Закарпаття створено першу українську мережу активних референцних станцій ZAKPOS/UA-EUPOS [11]. Через зручне географічне розташування Закарпатської області та транскордонну співпрацю із європейськими країнами ми можемо мати точну, щільну і часту вибірку значень IWV на значних територіях, що дозволяє визначати і прогнозувати динаміку зміни водяної пари в реальному часі.

Метою даної роботи є оцінка точності визначення осадженої водяної пари на основі ГНСС-даних та їхнє порівняння з одержаними значеннями осадженої водяної пари за даними аерологічного зондування атмосфери.

ВИЗНАЧЕННЯ ОСАДЖЕНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА ОСНОВІ ГНСС-ДАНИХ

Затримка за вплив атмосфери поділяється на гідростатичну $\Delta\rho_d$ та вологу $\Delta\rho_w$ складові. 10 % від повної тропосферної затримки складає волога. Амплітуда мікроколивань парціального тиску e водяної пари має випадковий характер і може досягти кількох мілібар всього за 10–20 с. Масштабний фактор парціального тиску, який визначає висоту h_e , на якій величина e зменшується в 2.72 разів, змінюється в широких межах — від 0.9 до 4.0 км. При значних інверсіях температури висота h_e досягає максимальних значень ($h_e \approx 4$ км). Отож, вологість повітря важко змоделювати. А для точного прогнозу погоди необхідна інформація виключної якості з високим просторово-часовим розділенням. Використання GPS дозволяє застосовувати відносно недорого технологію для регіонального і глобального моніторингу вмісту водяної пари в реальному часі.

Для визначення осадженої водяної пари необхідне значення $\Delta\rho_w$. Обробка ГНСС-спостере-

жень дає значення повної тропосферної затримки $\Delta\rho = \Delta\rho_d + \Delta\rho_w$.

З метою підвищення точності визначення IWV потрібно знати:

- значення тиску та температури на поверхні землі для виключення із загальної тропосферної затримки $\Delta\rho$ гідростатичної складової $\Delta\rho_d$;
- значення температури T_0 поверхні для визначення середньої температури T_m , які добре корелюють.

При забезпеченні таких умов слід очікувати підвищення точності визначення IWV. Поєднання наземних даних та GPS-спостережень дають нові перспективи дослідженням стану атмосфери.

Вплив нейтральної атмосфери на GPS-вимірювання. Рівняння для фазових спостережень має вигляд [1]

$$\Phi = \rho_R^S + \Delta\rho^{ion} + \Delta\rho - \Delta\rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + \lambda N - v_R^S, \quad (1)$$

де ρ_R^S — відстань між положенням GPS-супутника в епоху t^S (GPS) і положенням GPS-приймача в епоху t_R (GPS), $\Delta\rho^{ion}$ — іоносферна затримка, $\Delta\rho$ — тропосферна затримка, $\Delta\rho^{rel}$ — релятивістська поправка, v_R^S — шум вимірювання плюс незмодельовані ефекти, c — швидкість світла, N — число цілих циклів, λ — довжина хвилі, Δt^S і Δt_R — похибки годинників супутника й приймача відносно системного часу GPS відповідно.

Фаза несучої частоти може бути виміряна з точністю вище 0.01 циклу, що відповідає міліметровій точності.

Використання при обробці супутникових спостережень невідомих тропосферних параметрів дозволяє для кожної станції отримати значення тропосферної затримки.

Повну тропосферну затримку можна також визначити з даних аерологічного зондування атмосфери за формулою [1]

$$\Delta\rho = \Delta\rho_d + \Delta\rho_w = 10^{-6} \int N_d dh + 10^{-6} \int N_w dh, \quad (2)$$

$$N_d = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1},$$

$$N_w = \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1},$$

де N_d — коефіцієнти рефракції сухого повітря, N_w — коефіцієнти рефракції вологого повітря, P_d — тиск сухого повітря (мбар), e — парціальний тиск водяної пари (мбар), T — температура повітря, K_1 — коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря ($K \cdot \text{мбар}^{-1}$), K_2 — коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води ($K \cdot \text{мбар}^{-1}$), K_3 — коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води ($10^5 K^2 \cdot \text{мбар}^{-1}$).

Використовуючи рівняння Менделєєва — Клапейрона, одержуємо

$$N = K_1 R_d \rho + \left[K_2' \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1}, \quad (3)$$

де

$$K_2' = K_2 - K_1 \left(\frac{R_d}{R_w} \right) = K_2 - K_1 \frac{\mu_w}{\mu_d},$$

$R_d = 287.06 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — питома газова стала сухого повітря, $R_w = 461.525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ — питома газова стала водяної пари, ρ — загальна густина повітря, μ_d і μ_w — молекулярні маси сухого повітря і водяної пари.

Затримка за рахунок впливу гідростатичної складової атмосфери в zenітному напрямку складає

$$\Delta \rho_d^z = 10^{-6} K_1 R_d \int_{h_0}^h \rho dh. \quad (4)$$

Атмосферна затримка, спричинена впливом водяної пари, в zenіті дорівнює

$$\Delta \rho_w^z = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\max}} \left[K_2' \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1} dh. \quad (5)$$

Визначення осадженої водяної пари за допомогою GPS-спостережень. Використовуючи значення тропосферної затримки, отримане при обробці GPS-спостережень, осаджену водяну пару (IWV) можна визначити за формулою [5, 7] як загальну масу водяної пари в стовпчику повітря від поверхні Землі до кінця атмосфери з поперечним перерізом 1 м^2 :

$$IWV = \frac{\Delta \rho_w}{\xi}, \quad (6)$$

де

$$\xi = 10^{-6} R_w \left[K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right].$$

Тут середню температуру T_m можна знайти з виразу [3]

$$T_m = \frac{\int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh}{\int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh}. \quad (7)$$

З рівняння стану газу отримаємо

$$\left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} = \rho_w R_w,$$

де ρ_w — густина водяної пари. Тоді волога складова затримки матиме вигляд

$$\Delta \rho_w = 10^{-6} R_w \left[K_2' + \frac{K_3}{T_m} \right] \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_w dh. \quad (8)$$

Величина IWV може бути легко переведена в одиниці довжини, якщо розділити її на густину води ($\rho(\text{H}_2\text{O}) \cong 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$). Тоді вона інтерпретується як висота (в мм) стовпа води перерізом 1 м^2 , отриманої із сконденсованої пари. Її можна назвати осадженою водяною парою або простоосадженою водою (PW):

$$PW = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_w dh. \quad (9)$$

Очевидно, що $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} IWV$ відповідає $1 \text{ мм} PW$.

Отже, для переходу від $\Delta \rho_w$ до значень осадженої водяної пари необхідно знати середню температуру атмосфери над даним пунктом. Середня температура залежить від температури поверхні з великим коефіцієнтом кореляції. З цією метою потрібно побудувати регресійні залежності середньої температури T_m від температури на поверхні Землі T_0 у пунктах спостереження.

Обробка експериментальних даних. Точність визначення осадженої водяної пари IWV однозначно визначається величиною $\Delta \rho_w^z$, яка може бути визначена різними методами:

- на основі аерологічного зондування атмосфери,
- за модельними представленнями на основі наземних значень метеопараметрів,
- з GPS-спостережень, з вилученням гідростатичної складової.

Для дослідження IWV використано результати аерологічного зондування на $UT = 0^h$ і $UT = 12^h$

протягом року в Ужгороді, за якими обчислено загальну затримку $\Delta\rho_a$ та окремо гідростатичну $\Delta\rho_{d,a}$ і вологу $\Delta\rho_{w,a}$ складові тропосферної затримки. На ці ж моменти часу обчислено $\Delta\rho_m$, $\Delta\rho_{d,m}$, $\Delta\rho_{w,m}$ за наземними метеопараметрами (T , P , W) по моделі Саастамойнена [12] і по локальній моделі [2, 3], а також взяті значення тропосферних затримок $\Delta\rho_{GPS}$, одержані в центрі аналізу GPS-даних ГАО НАН України на ці ж моменти часу.

Дамо оцінку можливих похибок визначення тропосферної затримки різними методами.

Для наглядності, як приклад, на рис. 1 подано хід загальної атмосферної затримки протягом місяця, визначеної трьома методами: за аерологічними даними $\Delta\rho_a$, по моделі Саастамойнена $\Delta\rho_m$ та із GPS-спостережень $\Delta\rho_{GPS}$.

Зроблено порівняльний аналіз значень тропосферних затримок $\Delta\rho_a$, $\Delta\rho_m$, $\Delta\rho_{GPS}$. Значення поправок $\Delta\rho_{GPS}$ є близькими до поправок, обчислених методом числового інтегрування $\Delta\rho_a$. На значення поправки в радіодіапазоні великий вплив мають інверсії температури. Вони зумовлюють зростання парціального тиску атмосфери, який впливає на величину поправки $\Delta\rho_a$ і $\Delta\rho_{GPS}$. Модельні представлення тропосферних затримок $\Delta\rho_m$ не враховують вертикальний розподіл метеорологічних параметрів в атмосфері, де часто спостерігаються інверсії температури. За даними зондування атмосфери в Ужгороді було досліджено, що в шарах атмосфери до висоти 3 км інверсії температури спостерігаються в 73—97 % випадках. Інверсії на висотах 8—18 км (верхній шар) спостерігаються в 20—40 % зондувань. Особливо потужні інверсії спостерігаються вночі в зимовий період, в основному за рахунок радіаційних інверсій. Розподіл водяної пари на різних висотах має нерегулярні зміни. Немає кореляції між наземними значеннями вологості і зміни її з висотою. Середній вклад в атмосферну затримку інверсій температури становить від 29 до 64 мм, інверсій вологості: від 3 до 15 мм. Таким чином, різниці $\Delta\rho_a - \Delta\rho_m$ можуть досягати кількох сантиметрів (рис. 2).

Значення $\Delta\rho_a$ не можна вважати абсолютно точними. Кількість рівнів, на яких вимірювалися аерологічні параметри, залежить від частоти

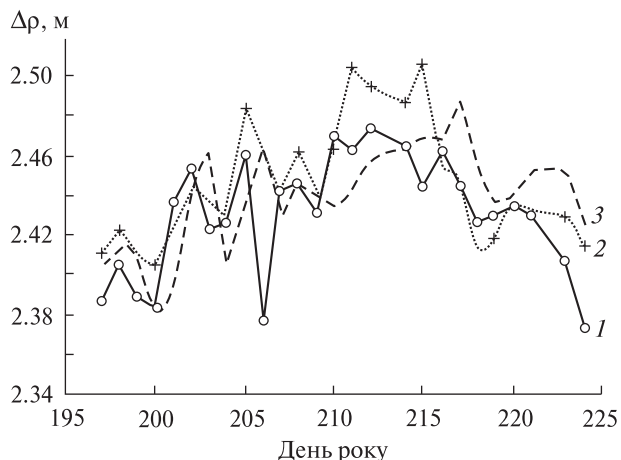


Рис. 1. Атмосферні поправки у відстань у проміжку 30 днів, отримані різними методами: 1 — на основі аерологічних даних ($\Delta\rho_a$), 2 — по моделі Саастамойнена ($\Delta\rho_m$), 3 — із GPS-спостережень ($\Delta\rho_{GPS}$)

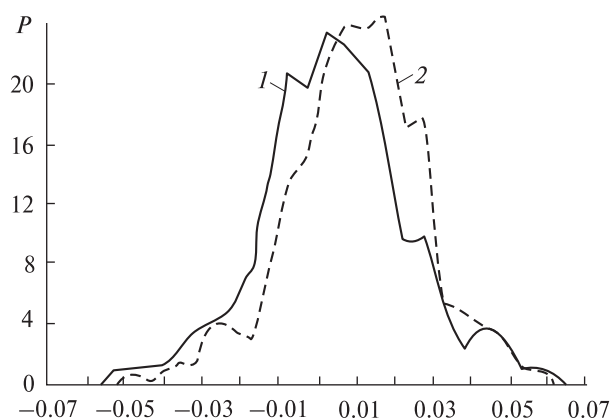


Рис. 2. Розподіл різниць атмосферних затримок в метрах: 1 — $\Delta\rho_a - \Delta\rho_m$, 2 — $\Delta\rho_a - \Delta\rho_{GPS}$

запиту радіозонда і висоти $h_{вр}$ верхньої границі вимірювань. Значення $h_{вр}$ лежать в межах від 5 до 20 км. Кількість рівнів при одному зондуванні лежить в межах 15—90. Точність вимірювань аерологічних параметрів залежить від типу радіозонда. В нашому випадку вона становить 1 мбар, 0.8°C і 5 % при вимірюванні тиску, температури і відносної вологості відповідно. Це дозволяє визначити коефіцієнт заломлення повітря з похибкою 10^{-6} . Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) ставить такі вимоги до точності радіозондових вимірювань:

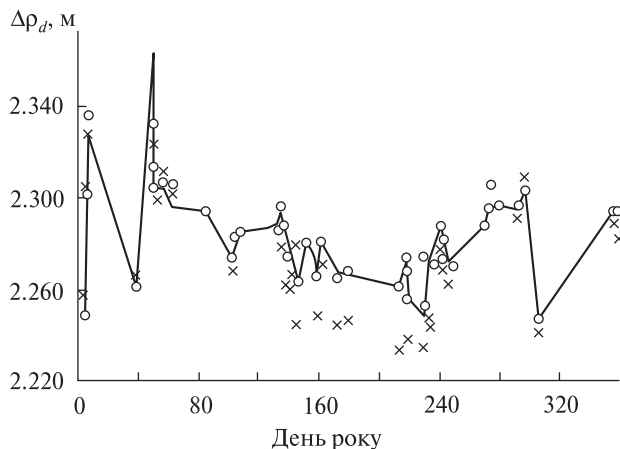


Рис. 3. Крива зміни гідростатичних затримок, обчислених за метеоропараметрами $\Delta\rho_{d,a}$ (суцільна лінія), значення поправок $\Delta\rho_{d,l}$, обчислені по локальній моделі (кружки) і значення $\Delta\rho_{d,m}$, отримані з моделі Саастамойнена (хрестики)

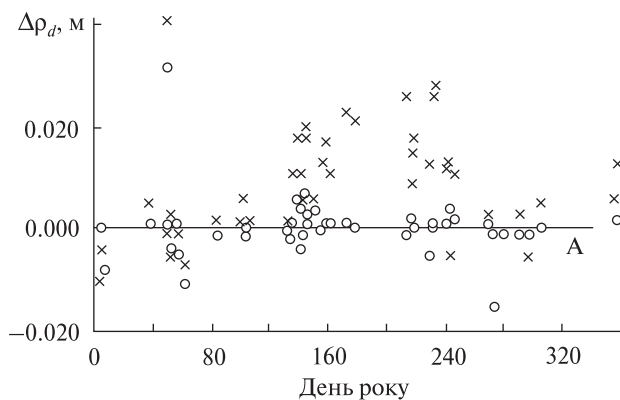


Рис. 4. Відхилення поправок, обчислених по локальній моделі ($\Delta\rho_{d,l}$, кружки) і по моделі Саастамойнена ($\Delta\rho_{d,m}$, хрестики), від значень $\Delta\rho_{d,a}$, визначених за аерологічними даними

$\Delta P = \pm 1$ мбар (від поверхні до рівня 5 мбар),
 $\Delta t = \pm 0.5$ °C (± 1 °C для діапазону від 100 мбар до 5 мбар),
 $\Delta W = \pm 5\%$ (у межах тропопаузи).

Похибка визначення $\Delta\rho_a$ в zenіті, спричинена похибками вимірювання метеопараметрів, дорівнює 0.6 — 12 см.

На рис. 2 наведено розподіл різниць атмосферних поправок $\Delta\rho_a - \Delta\rho_m$ та різниць $\Delta\rho_a - \Delta\rho_{GPS}$. По вертикальній осі — частота, віднесена до одиничного інтервалу значень цих різниць d :

$$P = \frac{m}{n \cdot \Delta d},$$

де m — число значень d , що попадає в відповідний інтервал Δd , n — число всіх значень d , що використовувалися в обчисленнях.

Розподіли різниць $\Delta\rho_a - \Delta\rho_m$ і особливо $\Delta\rho_a - \Delta\rho_{GPS}$ зсунуті вправо від нульового значення (рис. 2).

Можна вважати, що радіосигнал при GPS-спостереженнях проходить крізь атмосферу Землі миттєво. Враховується реальний стан нестабільної атмосфери. Проте сама величина $\Delta\rho_{GPS}$ визначається із псевдовідстані Φ після вилучення інших похибок (1). Окрім цього, безпосередньо знаходять $\Delta\rho_{GPS}$ не в zenіті, а на певній zenітній відстані, яку через функції відображення зводять до zenіту [8—10]. Отже, значення $\Delta\rho_{GPS}$ теж не є абсолютно точним. Тому такі різниці затримок (рис. 2) є реальними.

Для визначення IWV потрібно знати $\Delta\rho_w^z$ (5), яку визначають як різницю

$$\Delta\rho_w = \Delta\rho_{GPS} - \Delta\rho_{d,m}.$$

Проведено дослідження точності модельного представлення $\Delta\rho_{d,m}$. З цією метою гідростатичну затримку було обчислено по моделі Саастамойнена $\Delta\rho_{d,m}$ [12], по локальній моделі $\Delta\rho_{d,l}$, яка враховує регіональні, локальні і топографічні особливості пункту спостереження та по аерологічному зондуванню атмосфери $\Delta\rho_{d,a}$. Результати розрахунків наведено на рис. 3.

На рис. 4 наведені різниці поправок $\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,l}$ і $\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,m}$. Значення $\Delta\rho_{d,l}$, обчислене по локальній моделі, краще узгоджується із значеннями $\Delta\rho_{d,a}$, ніж $\Delta\rho_{d,m}$. Лише у дев'яти випадках із 56 різниця $|\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,l}|$ є більшою, ніж $|\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,m}|$. Їхні усереднені значення склали: $\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,l} = 0.0028 \pm 0.0048$ м, $\Delta\rho_{d,a} - \Delta\rho_{d,m} = 0.0092 \pm 0.0086$ м.

Отже, можна стверджувати, що створена локальна модель визначення гідростатичної затримки для п. Ужгород краще узгоджується з $\Delta\rho_{d,a}$, ніж модель Саастамойнена. Тому з метою підвищення точності значень осадженої водяної пари IWV при оперативній обробці ГНСС-даних доцільно використовувати локальні модельні представлення для гідростатичної складової тропосферної затримки.

Для визначення осадженої водяної пари (IWV) за формулами (5) і (6) необхідно знати середню температуру атмосфери T_m над даним пунктом. Вона лінійно залежить від температури T_0 на поверхні Землі у пунктах спостереження:

$$T_m = a T_0 + b. \quad (10)$$

За даними аерологічних спостережень в Ужгороді методом найменших квадратів було отримано залежність $T_m = 1.0383 T_0 - 6.7844$ (коефіцієнт кореляції $\rho = 0.94$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 3.094$). На рис. 5 наведено експериментальну залежність між середньою температурою і температурою поверхні. Спостереження проводились протягом року.

Отже, лінійна залежність (10) дає змогу визначити середню температуру T_m атмосфери за значеннями температури поверхні T_0 . Випадаюча водяна пара в атмосфері залежить також від точності визначення середньої температури, а отже і температури T_0 в даному пункті спостережень.

Значення iWV протягом року визначались на основі даних аерологічного зондування атмосфери (суцільна крива на рис. 6) та за даними GPS-спостережень (пунктирна крива на рис. 6).

За даний період досліджень IWV змінюється в межах від 0 до 40 мм, середнє значення становить 19.40 мм.

За даними спостережень знайдено розподіл різниць IWV , визначених двома методами (рис. 7, суцільна крива). Інтервали групування різниць $\Delta d = 0.5$ мм. Розподіл близький до кривої Гаусса (пунктирна крива на рис. 7) із середнім $d_c = 1.45$. Функцію Гаусса одержано методом найменших квадратів. Середнє квадратичне відхилення отриманого розподілу від кривої Гаусса дорівнює 0.012.

Для оцінки похибки визначення осадженої водяної пари значення IWV було також отримано на основі даних аерологічного зондування атмосфери з рівняння стану газу:

$$eV = \frac{M}{\mu} RT. \quad (11)$$

Приймаємо, що об'єм V — це стовпчик водяної пари в атмосфері висотою h з перерізом S і масою M . Тоді для однорідної атмосфери вираз

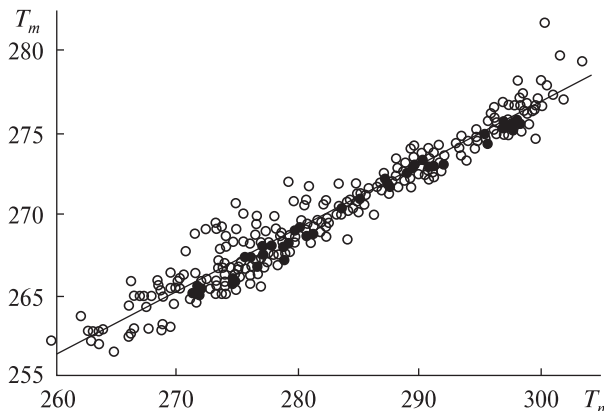


Рис. 5. Залежність середньої температури T_m від температури поверхні T_0

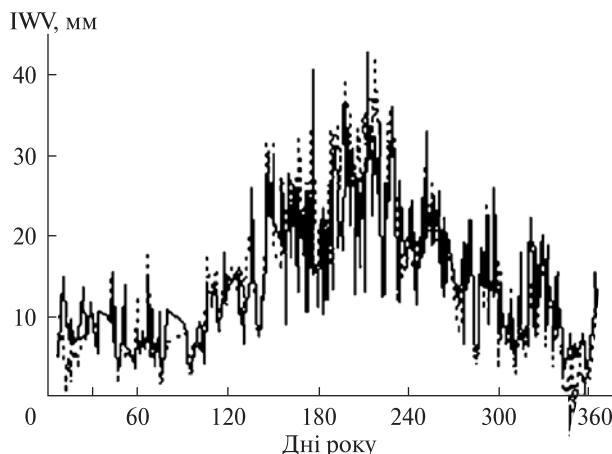


Рис. 6. Річна зміна осадженої водяної пари

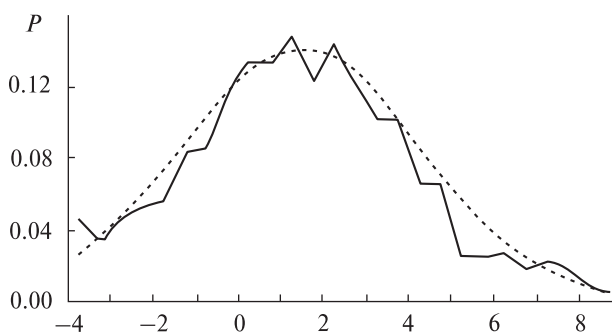


Рис. 7. Розподіл різниць значень IWV (мм) і крива Гаусса

(11) матиме вигляд

$$eh = \frac{M}{S} \frac{R_w}{\mu} T.$$

Оскільки в реальній атмосфері величини e і T є функціями висоти, а осаджена водяна пара

$$I WV = \frac{M}{S},$$

то з рівняння стану газу одержуємо формулу для обчислення осадженої водяної пари $I WV_e$ за аерологічними спостереженнями тиску водяної пари e і температури T :

$$I WV_e = \frac{\mu}{R_w} \int_{h_0}^h \frac{e(h)}{T(h)} dh. \quad (12)$$

У формулі (12) інтегрування проводиться від висоти пункту h_0 до висоти вологої атмосфери h .

За весь період досліджень значення осадженої водяної пари, обчисленої даним методом, змінюється у межах від 2.3 мм взимку до 42.75 мм влітку. Точність методу оцінюється відносною похибкою

$$d = \frac{I WV_{GPS} - I WV_e}{I WV_e},$$

і складає в середньому 2.7 %.

Осаджена водяна пара не залежить від вологості біля поверхні землі, але кореляційно залежить від наземної температури; коефіцієнт регресії дорівнює 0.75.

Значення $I WV_{GPS}$, отримані за результатами GPS-спостережень, в середньому більші від значень $I WV_e$, отриманих з формули (12) на основі даних аерологічних спостережень. Це пояснюється тим, що похибки визначення $I WV_{GPS}$ закладені в самому методі визначення. Модельне представлення з визначення гідростатичної складової атмосферної затримки $\Delta\rho_{m,d}$, що використовується при обробці ГНСС-даних, не враховує інверсії температури.

Таким чином, різниці середніх значень $\Delta\rho_d$, визначених двома методами (за даними аерологічного зондування та по моделі Саастамойнена) досягають 1 см. Це відповідає різниці $I WV = 1.5$ мм. Максимальні різниці між значеннями гідростатичних складових атмосферних поправок можуть досягати 3–4 см. Тоді $I WV$ визначається з похибкою 5–6 мм.

ВИСНОВКИ

Аналіз результатів визначення вмісту водяної пари в атмосфері протягом року на основі ГНСС-спостережень та аерологічного зондування атмосфери показав:

- спостерігається чітка кореляція між значеннями вологої складової тропосферної затримки та вмістом водяної пари в атмосфері, що і очікувалось;
- різниці зенітних атмосферних затримок, одержаних двома методами, що використовуються для визначення вмісту водяної пари в атмосфері, складають в середньому 1.5 см; похибка визначення $\Delta\rho_d$ в зеніті, спричинена похибками вимірювання метеопараметрів, змінюється від 0.6 до 12 мм;
- середні різниці гідростатичних атмосферних затримок обчислених на основі аерологічного зондування та по моделі Саастамойнена, близькі до 1 см;
- обчислені значення $I WV$ змінюються в межах 0–42 мм. Різниці значень $I WV_{GPS}$, отриманих за результатами GPS-спостережень та $I WV$, отриманих на основі аерологічних спостережень, лежать в межах 0.2–1.6 мм.

Використання ГНСС-спостережень у мережі активних референціальних станцій дозволяє проводити регіональний та глобальний моніторинг осадженої водяної пари.

Для підвищення точності визначення осадженої водяної пари $I WV$ потрібно:

- знати тиск та температуру на поверхні землі;
- знати середню температуру T_m , яка добре корелює із температурою T_0 поверхні.

При забезпеченні таких умов слід очікувати підвищення точності визначення $I WV$ до 1.5 мм. В окремих випадках, коли точність визначення $\Delta\rho_d$ за модельними представленнями складає 3–4 см, осаджена водяна пара буде визначатися з похибкою 5–6 мм. Тому з метою підвищення точності оперативної обробки ГНСС-даних доцільно використовувати локальні модельні представлення для гідростатичної складової тропосферної затримки.

Така оцінка похибок $I WV$ стосується вимірювання на певний момент часу (одиночних). Завдяки щосекундним (безперервним) GPS-вимі-

рюванням, слід очікувати підвищення точності визначення *IWV*. На основі ГНСС-спостережень в мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS та транс-кордонної співпраці із європейськими країнами ми можемо мати точну, щільну і часту вибірку значень *IWV* на значних територіях, що дозволяє визначати і прогнозувати динаміку зміни водяної пари в реальному часі.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. — Київ: Наук. думка, 1996. — 376 с.
2. Каблак Н. І., Клімик В. У., Швалагін І. В. та ін. Моніторинг осадженої водяної пари за допомогою GPS для прогнозування погоди // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 5/6. — С. 163–166.
3. Пат. на корисну модель № 49670 МПК: Y04B 10/00. Спосіб визначення водяної осадженої пари в атмосфері / Н. І. Каблак, Ю. Ю. Жигуц.
4. Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // Radio Sci. — 1985. — **20**, N 6. — P. 1593–1607.
5. Devis M., Businger S., Herring T. A., et al. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. — 1992. — **97**. — P. 15787–15801.
6. Elgered G., Plag H. P., Van der Marel H. Exploitation of groundbased GPS for operational numerical weather prediction and climate applications. — EC/COST, EUR, 2005. — 234 p.
7. Herring T. A., Anthes R. A., Ware R. H. GPS Metrology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the GPS // J. Geophys. Res. — 1992. — **97**. — P. 15787–15801.
8. Mendes V. B., Langley R. B. Tropospheric zenith delay prediction accuracy for airborne GPS high-precision positioning // Proc. The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, U.S.A., 1–3 June 1998. — Denver, 1998. — P. 337–347.
9. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res. — 1996. — **101B**, N 2. — P. 3227–3246.
10. Niell A. E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models // Phys. and Chemistry of the Earth. — 2001. — **26**. — P. 475–480.
11. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpathian region of Ukraine. — Берлін, 2008.
12. Saastamoinen I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction // Bull. Géodésique. — 1973. — **107**. — P. 13–34.

Надійшла до редакції 24.03.11

N. I. Kablak

MONITORING OF THE BESIEGED WATER VAPOR ON THE BASIS OF THE PROCESSING OF GNSS DATA

Zenith wet delay estimates derived from the analysis of GPS observations are used for operative weather forecasting and climate-change modelling. On the basis of these estimates, besieged water vapor values are determined for meteorology needs. We give some values of besieged water vapor which are derived from GNSS data processing and from results of aerologic sounding of the atmosphere.

УДК [520.8+002.53]:004

**И. Б. Вавилова¹, Л. К. Пакуляк¹, Ю. И. Процюк², Н. В. Вирун³, А. А. Шляпников⁶,
С. Г. Кашуба⁴, А. И. Пихун⁴, С. М. Андриевский⁴, А. Э. Мажаев², Л. В. Казанцева⁵,
А. В. Шульга², А. В. Золотухина¹, Т. П. Сергеева¹, А. П. Мирошниченко⁷,
И. Л. Андронов⁸, В. В. Бреус⁸, Н. А. Вирнина⁸**

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

³ Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. Івана Франка, Львів

⁴ Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова, Одеса

⁵ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, Київ

⁶ Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове

⁷ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

⁸ Одеський національний морський університет, Одеса

УКРАИНСКАЯ ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ (УкрВО). СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОБЪЕДИНЕННОГО АРХИВА НАБЛЮДЕНИЙ

Розглянуто сучасний стан спостережних архівів обсерваторій України за період 1898–2010 рр. з точки зору їхньої придатності до включення в УкрВО. Згідно з концепцією УкрВО, прийнятою Українською астрономічною асоціацією, база даних астронегативів є головною складовою УкрВО. Ця база даних буде містити всі фотоплівки, накопичені в Україні, та об'єднувати їх у єдиний оцифрований архів, що забезпечить користувачу легкий доступ до текстових даних і зображень через веб-інтерфейс і відповідний пошуковий механізм. Архіви даних, отримані за допомогою ПЗЗ- і радіоспостережень в Україні, також обговорюються як наукові складові УкрВО. Сформульовано перспективи розвитку об'єднаного цифрового архіву УкрВО.

ВСТУПЛЕНИЕ

Стремительное развитие астрономических исследований при помощи наземных и космических телескопов в последние десятилетия поставило перед международным научным сообществом ультимативную задачу разработки новых информационных технологий (ИТ), которые позволят быстро и единостандартно обрабатывать петабайтные массивы данных и обеспечи-

вать открытый доступ к центрам этих данных. Одним из решений по управлению астроинформационными ресурсами стала разработка несколькими странами концепции *астрономической виртуальной обсерватории* (ВО) как совокупности удобных программных средств для работы с разнородными базами данных (например, Astrogrid, SkyView, SIMBAD, HYPERLEDA, NED и др.), содержащих также виртуальные инструменты математических методов первичной обработки данных и расчетов физических характеристик небесных объектов. В рамках такой концепции обработки наблюдений работают также международные центры данных, полученных в результате многолетних мониторинговых наземных наблюдений (обзоров) небесных объектов в

© И. Б. ВАВИЛОВА, Л. К. ПАКУЛЯК, Ю. И. ПРОЦЮК, Н. В. ВИРУН, А. А. ШЛЯПНИКОВ, С. Г. КАШУБА, А. И. ПИХУН, С. М. АНДРИЕВСКИЙ, А. Э. МАЖАЕВ, Л. В. КАЗАНЦЕВА, А. В. ШУЛЬГА, А. В. ЗОЛОТУХИНА, Т. П. СЕРГЕЕВА, А. П. МИРОШНИЧЕНКО, И. Л. АНДРОНОВ, В. В. БРЕУС, Н. А. ВИРНИНА, 2011

широких зонах северного и южного неба (например SDSS в оптическом диапазоне, RADIO-NET в радиодиапазоне) или по результатам космических миссий (например INTEGRAL и SWIFT в гамма-диапазоне, «Chandra» и XMM в рентгеновском диапазоне), а также центры данных ЕКА, НАСА и других космических агентств.

Создание астрономической виртуальной обсерватории — это достаточно длительный процесс, требующий комплексной работы как по упорядочиванию данных, полученных в прошлом, так и разработки стандартов для архивирования будущих данных. При этом уникальность астрономической виртуальной обсерватории состоит также в том, что появляется возможность использования архивов данных, содержащих информацию о миллионах небесных объектов в разных диапазонах электромагнитных длин волн. Это открывает новые перспективы исследования Вселенной и комплексного понимания астрофизических явлений.

Концепция ВО, основанная на использовании современных ИТ обработки, хранения, анализа и управления, онлайн доступа и распространения данных, требует унифицировать архивы астроинформации в каждой стране с целью их сохранения и дальнейшего использования для постановки новых научных задач.

Для создания объединенного цифрового архива (ОЦА) наблюдений, позиционируемого как ядро УкрВО [3], наиболее важны следующие положения концепции ВО (www.ivoa.net/Documents):

- объединение ресурсов интероперабельных астрономических данных обсерваторий на национальном и международном уровнях (в виде архивов астронегативов прямых изображений участков неба и отдельных небесных объектов, спектров небесных объектов, каталогов и баз данных и т. п.);

- разработка удобной унифицированной интерактивной поисковой системы доступа к этим данным, пакетов прикладных программ для обработки данных и выполнения астрономических исследований.

Отметим, что виртуальная обсерватория — это ресурсная система, которая позволяет легко

и просто опрашивать большое количество астрономических и космических центров данных; предоставляет новые мощные инструменты для визуализации и анализа данных; создает стандарты для публикации центрами данных своих ресурсов и предоставления услуг по их обработке. Возможности ВО реализуются с помощью стандартизации данных и метаданных, стандартизации методов обмена данными, использования регистра, который содержит данные обо всех доступных информационных ресурсах и инструментах по их обработке.

На конец 2010 г. в Международный альянс виртуальных обсерваторий (IVOA), созданный в июне 2002 г. с целью облегчения международной координации в развитии прикладных пакетов программного обеспечения ВО, систем и организационных структур, позволяющих использовать астрономические архивы, входит 16 виртуальных обсерваторий стран-участниц IVOA (www.ivoa.net). Членство в IVOA открыто для других национальных и международных проектов в соответствии с правилами участия, и Украина со своим национальным проектом (УкрВО) планирует войти в состав IVOA в 2011 г. Проект УкрВО, который развивается при непосредственном участии авторов этой статьи, на 5-м съезде Украинской астрономической ассоциации (июнь 2009 г.) определен как приоритетное направление астрономических исследований в Украине на 2009 — 2016 гг. С учетом указанных фактов и обстоятельств современного развития астрономии данные из всех астрономических учреждений Украины должны быть размещены в объединенном цифровом архиве, т. е. эти данные станут доступными для всех исследователей в Украине и других странах. Это, в свою очередь, создаст условия для признания этих архивов как национального достояния, которое создавалось благодаря упорному труду многих поколений астрономов, работавших в Украине.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ УкрВО

Концепция УкрВО включает в себя положения о научных составляющих УкрВО, ее астроинформационном ресурсе, организационной структуре и существующей ИТ-поддержке, определяет

первоначальный перечень научных исследований с использованием баз данных УкрВО, а также очерчивает первоочередные шаги реализации УкрВО как национального астрономического проекта Украины на 2010 — 2015 гг. [3, 4].

Целью УкрВО является создание ОЦА и информационной системы управления ним и доступа к открытому реестру данных об астрономических ресурсах Украины, включающей средства администрирования реестра и взаимосвязанных/объединенных баз астрономических данных, поисковые интерфейсы для удаленных пользователей, онлайн-сервисы анализа и обработки данных, средства доступа к инструментам зарубежных ВО, средства обучения приемам работы с инструментарием ВО, обеспечение общеукраинской инфраструктуры передачи данных обсерваторий в сеть интернет и т. д., а также средства собственного развития и вовлечения в проект УкрВО новых участников и новых научных проектов.

Организационной составляющей УкрВО является консорциум астрономических обсерваторий Украины — собственников уникальных архивов фотографических, спектральных и ПЗС-наблюдений, предоставляющих эти архивы для открытого доступа. На текущем этапе в консорциум УкрВО входят: Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (г. Киев), Радиоастрономический институт НАН Украины (г. Харьков), пять астрономических обсерваторий в структуре МОН Украины — НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» Госкомитета Украины по науке, инновациям и информатизации, НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (п. Научный, АР Крым), Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Т. Шевченко, Астрономическая обсерватория Львовского национального университета им. И. Франко и НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И. И. Мечникова, а также кафедра «Высшая и прикладная математика» Одесского национального морского университета.

Научно-астроинформационная составляющая концепции УкрВО включает в себя такие основные положения:

- объединенный архив данных фотографических наблюдений небесных объектов, сохраненных в стеклянных архивах (стеклотеках) обсерваторий Украины с 1898 г. по 1990 гг.,
 - объединенный архив ПЗС-наблюдений небесных объектов (с начала 1990-х гг.),
 - объединенный архив спектральных наблюдений небесных объектов (в оптическом, УФ-, радио- и гамма-диапазонах), начатых в 1940-х гг;
 - информация о каталогах и базах данных, созданных в обсерваториях Украины с начала их деятельности, и вошедших в международные центры данных;
 - научно-образовательный ресурс — библиографическая информация (монографии и учебники, а также статьи, опубликованные во всех журналах Украины, издаваемых обсерваториями за время их деятельности; проведение онлайн-лекций и семинаров, наблюдений небесных объектов при помощи интернет-телескопов и т. п.);
- Доступ к информационным и программным ресурсам УкрВО будет обеспечен через создаваемый в настоящее время сайт УкрВО (в дальнейшем — портал УкрВО как национальный модуль в рамках IVOA).

АРХИВ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ УКРАИНЫ

Общая характеристика объединенного архива. Уникальная фотографическая информация об астрономических событиях, содержащаяся на астронегативах, хранится в стеклотеках обсерваторий по всему миру, - общее число накопленных фотопластинок составляет около 2.1 млн. В 1990-х гг. рабочая группа IVOA и MAC под руководством М. К. Цветкова инициировала работу по составлению списка архивов астронегативов (Catalogue of Wide-Field Plate Archives, <http://www.skyarchive.org/catalogue.html>, WFPDB — архив широкоугольных стеклянных библиотек) по сведениям примерно 200 астрономических учреждений мира и подготовленным согласно разработанному этой группой форматам подачи данных. В настоящее время список содержит данные о 345 коллекциях, где приведены также координаты обсерваторий и характеристики инструментов, на которых выполнены наблю-

дения, общее число пластинок в архиве обсерваторий и годы их получения. Каталог WFPDB содержит основную информацию по индивидуальным пластинкам (экваториальные координаты центра, эмульсия, фильтр, размер поля, время наблюдений и т. д.), которую обсерватории предоставили в едином формате. Однако многие обсерватории, в том числе обсерватории Украины, еще сохраняют данные только в табличной форме (см. [30]). Состояние архива WFPDB анализируется в работе [23].

Три обсерватории мира являются собственниками наиболее крупных фотографических коллекций (больше 100 тыс. астронегативов), прежде всего это Гарвардская обсерватория в США (500 тыс. негативов, с 1885 г.) и Зоннебергская обсерватория в Германии (около 300 тыс. негативов, с 1926 г.). В архиве Астрономической обсерватории Одесского национального университета им. И. И. Мечникова — третьей в мире обсерватории-собственника крупной фотографической коллекции — содержится около 104 тыс. пластинок, с 1909 г.: 20 тыс. старинных, включая коллекцию Симеизской обсерватории, и более 80 тыс., полученных в Одессе в с. Маяки, начиная с 1957 г. (большую часть этой коллекций составляют прямые фотографические снимки, выполненные по программам наблюдений переменных звезд).

Объединенный e-архив фотографических наблюдений, выполненных в астрономических обсерваториях Украины с 1898 г., является ядром научной составляющей УкрВО. При этом неоцифрованные стеклянные библиотеки обсерваторий Украины все еще представляют собой труднодоступное хранилище огромного объема астрономических данных, зачастую обработанных на несколько процентов от их настоящего потенциала. Основными проблемами оперативного создания объединенного e-архива фотографических наблюдений УкрВО являются отсутствие полной информации об имеющихся в обсерваториях наблюдательных архивах и их характеристиках (наиболее полно представлены фотографические наблюдения последних лет, наименее — самые старые наблюдения), их неоднородность по форматам хранения данных

(как правило, хранение организует группа, работавшая над задачей, для которой был получен наблюдательный материал, в произвольном формате без систематизации и структурирования данных), а также субъективный фактор: готовность инфраструктуры обсерваторий к созданию собственного архива и целостность архивных данных (множественность мест хранения, наличие или отсутствие журналов наблюдений, регистрационных записей, данных об инструментах и оборудовании и т. д.).

Современное состояние архивов фотографических наблюдений астрономических обсерваторий Украины приведено в табл. 1. Описание каждого из архивов представлено ниже.

Из табл. 1 следует, что выполнять поиск информации даже в отдельном стеклянном архиве — задача почти невыполнимая из-за проблем его упорядоченности, наглядности, возможности использовать алгоритмы поиска, затрат времени, производительности, старения носителей, физической потери информации и т. д. Что же касается совместного использования многих архивов, то проблема вообще не имеет решения, особенно с учетом их физической удаленности.

Оцифрованные архивы лишены всех этих недостатков и позволяют получить информацию в полном объеме по совокупности архивов и в конечные промежутки времени. Задача их оцифровки, даже только в пределах упомянутых выше учреждений, невозможна без создания цифровых баз данных этих архивов и разработанных на их основе программных средств доступа к научной информации.

В связи с тем, что основными задачами при создании ОЦА являются накопления цифровых изображений астронегативов и разработка средств их использования, а также учитывая ограниченность региональных ресурсов для оперативного получения таких изображений, дальнейшее развитие этих работ требует создания мобильных средств оцифровки архивов.

Архив фотографических наблюдений ГАО НАН Украины. В ГАО НАН Украины с 2002 г. последовательно проводятся работы по созданию цифрового архива коллекции стеклянной библиотеки и преобразованию его в элемент ВО,

что требует особого внимания к качеству и достоверности содержимого архива и тщательного подхода к его наполнению [28]. Анализ международного опыта по виртуализации фотографических архивов дал возможность разработать концепцию базы данных стеклотеки ГАО, принципы верификации содержимого базы данных на регулярной основе для повышения степени достоверности каталогизируемых данных, а также подобрать методику оцифровки пластинок, ориентированную на использование серийных планшетных сканеров и интернет-адаптированной программной среды [26].

На основе разработанного в ГАО программного пакета DBGPA V2.0 обеспечен открытый

доступ к базе данных (БД) астронегативов через поисковый интерфейс с гибкой организацией поиска в разных режимах посредством механизма формирования запросов.

Полная коллекция астронегативов ГАО НАН Украины насчитывает около 80 тыс. пластинок, полученных по семи наблюдательным программам за период с 1949 по 1990 гг. на 15 инструментах. Основные:

- двойной длиннофокусный астрограф ($F/D = 5500/400$) — 10.5 тыс. пластинок;
- двойной широкоугольный астрограф Цейса ($F/D = 2000/400$) — 9.7 тыс. пластинок;
- двойной короткофокусный астрограф ($F/D = 700/120$) — 4.2 тыс. пластинок;

Таблица 1. Современное состояние архивов фотографических наблюдений астрономических обсерваторий Украины

| Учреждение | Примерное количество пластинок | Годы наблюдений | Научные программы | Степень готовности | Примечания |
|------------|--------------------------------|------------------------|---|---|---|
| ГАО НАНУ | 85000 | 1949—1999 | Галактики, QSO, ФОН, МЕГА, переменные звезды, рассеянные звездные скопления, фундаментальные звезды, кометы, малые планеты, ИСЗ | Каталогизирована, база данных, онлайн доступ | 26500 прямых снимков; $m_{pg} = 11-16^m$; 2500 пластинок оцифровано |
| НАО | 200 8.500 | 1929—1931 1961—1999 | Звездные скопления, зодиакальные звезды, малые планеты, кометы | Каталогизирована, база данных, онлайн доступ | Оцифровано 2700 использование VO tools |
| КрАО | 20000 | 1938—1965 1984 | Галактики, звезды, кометы, малые планеты, газовые туманности | Каталогизирована, база данных, локальный доступ | «dBASE+» формат $m_{pg} = 16-18^m$ $m_v = 12-14^m$ |
| АО КНУ | >20000 | 1898—1916 1945—1996 | Фундаментальные звезды, рассеянные скопления, QSO, Луна, Солнце | Систематизировано около 4500 пластинок | 200 оцифровано |
| АО ЛНУ | 160 8000 | 1939—1945 1946—1976 | Новые и переменные звезды, покрытие звезд Луной; Кометы, малые планеты, переменные звезды | 50 % каталогизировано, база данных, онлайн доступ | Начат процесс оцифровки стеклотеки |
| АО ОНУ | 10000 | 1909—1953 | Малые планеты | | Коллекция Симеизской АО (упорядочены журналы наблюдений) |
| | | | Переменные звезды Переменные звезды, кометы, малые планеты, ИСЗ. QSO | 10 % каталогизировано, 10 % онлайн доступ | 80 % прямых снимков (RA: $0^h...24^h$ Dec: $-15^\circ...+90^\circ$) Фотометрически однородные |

- трехкамерный астрограф ($F/D = 500/100$, 1200/110, 1700/150) — 1 тыс. пластинок;

- зеркальный телескоп АЗТ2 ($D = 700$) — 1.1 тыс. пластинок.

Остальные пластинки получены на десяти зарубежных инструментах (Эквадор, Россия, Узбекистан, Грузия, Армения).

Научные программы, для которых получались пластинки, приведены в табл. 2. В табл. 3 перечислены наблюдательные архивы, включенные в БД DBGPA, и формат которых отвечает требованиям WFPDB. Звездочкой отмечены архивы, созданные недавно и еще не занесенные в WFPDB или не относящиеся к WFPDB. После систематизации коллекции пластинок ГАО НАН Украины были созданы и размещены на веб-странице

ГАО (<http://www.mao.kiev.ua/dept/cat4.html>) и в международной базе данных широкоугольных наблюдений WFPDB (www.skyarchive.org) цифровые картотеки (данные журналов наблюдений) более чем для 26.5 тыс. пластинок коллекции ГАО — прямых снимков северного неба. На их основе создана расширенная онлайн-база с доступом через интернет — база данных архива пластинок (DBGPA) и обеспечена возможность ее оперативного наполнения. Предельная звездная величина для большинства пластинок составляет 14—16^m.

Архив фотографических наблюдений НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НАО). Фотографические наблюдения в НАО начались в 1961 г. на зонном астрографе фирмы

Таблица 2. Научные программы, для которых были получены пластинки коллекции ГАО

| Научные программы | Инструмент | Масштаб, сд/мм | Период наблюдений | Предельная звездная величина | Примерное количество пластинок |
|--|------------|----------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Площадки неба с галактиками | DLA | 38 | 1950—1986 | 13.6—16.0 ^m | 1100 |
| | DWA | 103 | 1976—1986 | До 16.0 | 300 |
| | DSA | 295 | 1987—1990 | 12.0—13.0 | 100 |
| Площадки неба с радиоисточниками | DAZ | 68.8 | 1986—1988 | До 18.0 | 20 |
| | Zeiss-600 | 28 | 1986—1989 | До 18.5 | 100 |
| Избранные площадки неба: (SPO, Aql, Cyg, Cas Her, Tau, Leo, Orion...) | DWA | 103 | 1976—1984 | До 16.0 | 400 |
| | DSA | 295 | 1949—1990 | До 14.0 | 2080 |
| | 3CA | 172; 412 | 1955—1961 | До 12.8 | 840 |
| Фундаментальные звезды | DLA | 38 | 1956—1985 | 14.0—14.5 | 1770 |
| | DWA | 103 | 1985—1990 | До 15.5 | 150 |
| Спец программы: (скопления, переменные звезды, кратные звезды и т. д.) | DLA | 38 | 1950—1985 | 12.0—15.5 | 2760 |
| | DWA | 103 | 1977—1978 | До 16.0 | 30 |
| | DSA | 295 | 1949—1990 | До 16.0 | 2000 |
| Обзор северного неба (FON) | DWA | 103 | 1981—1993 | 15.3—16.0 | 2400 |
| | DAZ | 69 | 1981—1989 | До 17.0 | 90 |
| Планеты и их спутники (Венера, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) | DLA | 38 | 1960—1985 | 10.0—15.0 | 1300 |
| | DWA | 103 | 1986—1988 | До 14.0 | 300 |
| | Zeiss-600 | 28 | 1986—1990 | До 16.0 | 250 |
| Малые планеты | DLA | 38 | 1952—1986 | До 14.0 | 557 |
| | DWA | 103 | 1976—1996 | До 14.5 | 1100 |
| | DSA | 295 | 1949—1990 | 12.0—13.0 | 20 |
| Кометы | DWA | 103 | 1976—1996 | До 16.0 | 625 |
| | DSA | 295 | нет данных | нет данных | 270 |
| | 3CA | 172 | 1955—1961 | До 12.8 | 10 |
| Геостационарные спутники | DWA | 103 | 1983—2003 | До 16.0 | 3656 |
| Луна | DLA | 38 | 1954—1986 | | 1100 |
| Активные солнечные образования | | | | | ≈ 10000 |
| Спектры Солнца и планет | AZT-2 | | С 1960 | | > 50000 |

Таблица 3. Перечень наблюдательных архивов, включенных в базу данных. DBGPA V2.0

| Идентификатор инструмента | Местонахождение архива; место наблюдений | Номер по Марсдену; тип негативов; часовая зона | Долгота; широта; высота места наблюдений, м | Количество труб, апертура (диаметр зеркала, м) | Фокус, м; [масштаб, "/мм]; рабочее поле, град | Период действия; число прямых снимков; оценка /в БД |
|---|--|--|---|--|---|---|
| АВА020* 2САА [астрограф] | Киев, Украина; Астрофизическая обсерватория, Абастумани, г. Канобили Грузия | 119 стекло 4 | 42°49' 41°45.3' 1580 | 2 × 0.2 | 1 [206] 13.7 | 1990—1990 30/29 |
| АВА039В* SCHC [Шмидт] | Киев, Украина; Астрофизическая обсерватория, Абастумани, г. Канобили Грузия | 119 пленка 4 | 42 49 41 45.3 1580 | 39 [44] | 0.62 [330] 8.2 | 1987—1987 7/70 |
| ВYU053* 53/53 cm Schmidt [Шмидт] | Киев, Украина; Бюраканская Астрофизическая обсерватория, Бюракан Армения | 123 стекло 4 | 44 17.5 40 20.1 1500 | 0.53 [0.53] | 1.83 [113] 5 | 1985—1985 28/50 |
| ВYU100* ВYU [Шмидт] | Киев, Украина; Бюраканская Астрофизическая обсерватория, Бюракан Армения | 123 стекло 4 | 44 17.5 40 20.1 1500 | 100 [1] | 2.13 [97] 4 | 1983—1983 15/0 |
| ЕАО035* MNT [мениск] | Киев, Украина; Обсерватория им. Энгельгардта, Казань, Россия | 136 стекло 3 | 48 49 55 50.3 98 | 0.35 [0.49] | 1.2 [172] 3.5 | 1988—1990 28/0 |
| ЕАО040В* DWAZ [астрограф] | Киев, Украина; ГАО Южная станция Обсерватория им. Энгельгардта, Зеленчук, Россия | 114 стекло 2 | 41 26.6 43 39.2 2040 | 0.4 | 2 [103.16] 8.6 | 1982—1993 142/149 |
| GUA010А 3СА [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0.1 | 0.5 [412] 20 | 1957—1961 436/436 |
| GUA010В 3СА [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0.1 | 0.5 [412] 20 | 1957—1961 279/279 |
| GUA011А 3СА [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0.11 | 1.2 [172] 8 | 1955—1957 35/35 |
| GUA011В 3СА [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0.11 | 1.2 [172] 8 | 1955—1957 55/55 |
| GUA012А DSA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.12 | 0.7 [295] 20 | 1949—1990 2035/2041 |
| GUA012В DSA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.12 | 0.7 [295] 20 | 1949—1978 2148/2142 |
| GUA015 3СА [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0.15 | 1.7 [121] 6 | 1955—1961 162/162 |
| GUA040А DLA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.4 | 5.5 [38] 2.5 | 1949—1986 8486/8486 |

Окончание табл. 3

| Идентификатор инструмента | Местонахождение архива; место наблюдений | Номер по Марсдену; тип негативов; часовая зона | Долгота; широта; высота места наблюдений, м | Количество труб, апертура (диаметр зеркала, м) | Фокус, м; [масштаб, "/мм]; рабочее поле, град | Период действия; число прямых снимков; оценка /в БД |
|--------------------------------------|--|--|---|--|---|---|
| GUA040B DLA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.4 | 5.5 [38] 2.5 | 1949—1986 649/649 |
| GUA040C DWA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.4 | 2 [103] 8.5 | 1976—1996 4285/4288 |
| GUA040D DWA [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 2 × 0.4 | 2 [103] 8.5 | 1976—1996 1840/1840 |
| GUA040E DWA(C)+ASC [астрограф] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 29.7 50 21.9 211 | 2 × 0.4 | 2 [103] 6.8 | 1981—2005 3656/3656 |
| GUA070A AST2 [рефлектор] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0 [0.7] | 3.15 [65.5] 1 | 1960—1973 570/570 |
| GUA070B AST2 [рефлектор] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0 [0.7] | 10.5 [20] 0.7 | 1960—1973 487/487 |
| GUA070C AST2 [рефлектор] | Киев, Украина; ГАО НАН Украины | 083 стекло 3 | 30 30 50 21.9 211 | 0 [0.7] | 3.11 [66] 0.7 | 1960—1973 67/67 |
| MAJ060 Zeiss-600 [рефлектор] | Киев, Украина; Майданакская обсерватория, Киевская станция Узбекистан | 188 стекло 5 | 66 52.8 38 41 2600 | 0.6 [0.6] | 7.5 [28] 0.5 | 1986—1991 544/544 |
| QUI021A* AFU-75 [камера] | Киев, Украина; АО Кито, Эквадор | 781 пленка -4 | -78 29.3 0 12.6 2860 | 0.210 | 0.74 [281] 10.6 | 1986—1986 66/66 |
| QUI021B* AFU-75 [камера] | Киев, Украина; Кометная станция Кито, Эквадор | 782 пленка -4 | -78 21 0 0 2270 | 0.210 | 0.74 [281] 10.6 | 1986—1986 48/48 |
| TAS040A DAZ [астрограф] | Киев, Украина; Ташкентская АО, Китабская станция, Узбекистан | 186 стекло 5 | 66 53 39 8 690 | 2 × 0.4 | 3 [68.8] 5.5 | 1981—1989 134/134 |
| TAS040B DAZ [астрограф] | Киев, Украина; Ташкентская АО, Китабская станция, Узбекистан | 186 стекло 5 | 66 53 39 8 690 | 2 × 0.4 | 3 [68.8] 5.5 | 1981—1989 59/59 |

Примечание: AST2 — АЗТ-2 ГАО НАН Украины; DAZ — Двойной широкоугольный астрограф Цейса, станция Китаб, Узбекистан; DLA — Двойной длиннофокусный астрограф, ГАО НАН Украины; DSA — Двойной короткофокусный астрограф, ГАО НАН Украины; DWA — Двойной широкоугольный астрограф Цейса, ГАО НАН Украины; DWA(C)+ASC — Двойной широкоугольный астрограф Цейса, труба С, со спутниковой камерой, ГАО НАН Украины; 3СА — Трехкамерный астрограф ГАО НАН Украины; AFU-75 — Фотографическая астрономическая камера, обсерватория Кито, Эквадор; Zeiss-600 — Рефлектор Цейса, Майданак, Киевская станция, Узбекистан; 2САА — Двухкамерный астрограф, Абастуманская обсерватория, Грузия; SCHC — Телескоп Шмидта, Двойной широкоугольный астрограф; Schmidt — Телескоп Шмидта, Бюраканская обсерватория, Армения; BYU — Метровый телескоп Шмидта, Бюраканская обсерватория, Армения; MNT — Менниковый телескоп, обсерватория им. Энгельгардта, Казань, Россия; DWAZ — Двойной длиннофокусный астрограф Цейса, ст. Зеленчук, обсерватория им. Энгельгардта, Россия

К. Цейса. В Пулковое на нем в 1929—1931 гг. была сфотографирована полярная область и в результате был получен каталог С. И. Белявского. Затем инструмент работал в Симеизской обсерватории. Во время второй мировой войны зонный астрограф сильно пострадал, и после возобновления механики телескопа на заводах г. Ленинграда в 1960 г. был перевезен в Николаев [8].

Архив НАО состоит из двух частей, которые были получены с помощью одного зонного астрографа: в 1929—1931 гг. в ГАО РАН (Пулково, Россия) и в 1961—1999 гг. в НАО. В 1929—1931 гг. велись фотографические наблюдения звёзд в близполюсной зоне. На основе обработки 200 пластинок был создан каталог, содержащий положения 11322 звёзд от 70 до 90° по склонению на среднюю эпоху 1929.0.

В 1990-х гг. были получены пластинки с целью создания звёздных каталогов, однако эти проекты не были завершены и пластинки не были обработаны, т. е. в архиве есть данные, которые нигде и никогда не фигурировали в научных исследованиях.

С 1961 по 1999 гг. на зонном астрографе в Николаеве велись регулярные наблюдения тел Солнечной системы с целью определения их точных положений [5—7]. За этот период получено следующее количество положений: большие планеты (за исключением Меркурия и Плутона) — 2073, Галилеевы спутники Юпитера — 1314, яркие спутники Сатурна — 604, избранные малые планеты — 2450, кометы — около 200.

В 2006—2007 гг. была проведена работа по подготовке текстовых файлов о составе фотографического архива в формате международной базы данных широкоугольных пластинок (WFPDB, англ.), которая создана на сайте Института астрономии (София, Болгария, <http://www.skyarchive.org/search/>).

В 2008 г. информация о составе архива НАО была внесена в эту базу данных. К середине 2010 г. на учёте фотографического архива находится около 8.5 тысяч фотопластинок. Доступ к данным о пластинках архива, включая оцифрованные изображения, осуществлен с поисковых страниц сайта обсерватории (<http://www.mao.nikolaev.ua>).

Архив фотографических наблюдений НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» МОН Украины (КрАО). Фотографический архив НИИ «КрАО» содержит около 11 тысяч прямых снимков и 500 пластинок со спектральными наблюдениями с помощью объективной призмы. Они были получены с начала 1950-х — до начала 1970-х гг. в ходе исследования областей Млечного пути и обзора пояса астероидов, проводившегося систематически с 1963 по 1998 гг. в эклиптической полосе неба шириной 40°. Данные о коллекции снимков в областях Млечного пути, содержащей около полутора тысяч пластинок (из них 839 прямых снимков и свыше 500 пластинок со спектральными наблюдениями с объективной призмой), каталогизированы, занесены в локальный банк данных в формате 'dBASE III' и переданы в глобальную базу данных широкоугольных наблюдений WFPDB.

В НИИ «КрАО» ведутся работы по созданию локальной базы данных в сотрудничестве с Софийским центром данных астрономических архивов в рамках Договора о сотрудничестве между ГАО НАНУ и Болгарской АН, а также с Институтом астрономии РАН, который ведёт проект по созданию базы данных астронегативов российских обсерваторий и обсерваторий бывшего СССР.

Архив фотографических пластинок КрАО состоит из коллекции Симеизской обсерватории, коллекции, полученной по программе исследований Млечного Пути, и коллекции обзора малых планет. Коллекция Симеизской обсерватории хранится в АО ОНУ.

Коллекция пластинок, полученных по результатам наблюдений программы Г. А. Шайна по исследованию газовых туманностей в Млечном Пути и связанных с ними горячих звезд, а также площадок для фотометрических стандартов, в т. ч. областей Северного Полярного ряда, содержит негативы с 1949 г. по 1965 гг. и снимки 1984 г. Коллекция обзора малых планет содержит около 10 тысяч пластинок с изображениями малых планет и комет, полученных в КрАО с 1963 по 1998 гг. Каждая пластинка покрывает область площадью 100 кв. град. Данные об этих коллекциях находятся только в локальном доступе.

Архив фотографических наблюдений Астрономической обсерватории Львовского национального университета им. И. Франко (АО ЛНУ). С 1934 г. в АО ЛНУ проводились фотографические наблюдения звездного неба с целью поиска и исследования переменных звезд и фотографическая фотометрия для составления каталога фотовизуальных величин околополюсных звезд. Попутно проводились наблюдения отдельных переменных звезд различных типов, новых звезд, покрытий звезд Луной. Инструменты, на которых получены пластинки: камера с объективом триплет Цейса ($D = 100$ мм, $F = 500$ мм), рефрактор Мерца, астрокамера ($D = 140$ мм, $F = 700$ мм) и рефрактор Цейса ($D = 130$ мм, $F = 2400$ мм). Около 180 пластинок архива получены в годы второй мировой войны. К сожалению, сохранились не все журналы наблюдений за этот период.

В 1945–1950 гг. проводились фотографические наблюдения переменных звезд, новых звезд, комет, лунных затмений. На астрокамере Цейса ($D = 100$ мм, $F = 500$ мм) продолжались фотографические наблюдения избранных участков неба с целью исследования переменных звезд, расположенных к югу от Северного полюса до $\delta = 10^0$.

На сегодняшний день АО ЛНУ является владельцем ценного архива, в котором сохраняются фотографические пластинки, начиная с 1939 г. Форматы пластинок 90×120 мм, 130×180 мм. Пластинки не всегда обработаны либо обработаны частично в соответствии с поставленными задачами. Временной интервал архива составляет 37 лет (1939–1976 гг.). Общее количество пластинок Львовской коллекции насчитывает приблизительно 8000, среди них почти 6000 пластинок являются прямыми снимками северного неба. В обсерватории кроме новых и переменных звезд, велись наблюдения комет (Виппл-Федтке, Туттл — Джакобини, Хонда — Бернаскони 1955, Мркоса 1955, Бернхама, Арнда — Роланда, Олкока, Икея-Секи, Килстона, Де Вико-Свифт, Эверхарта и др.), и малых планет. Наблюдения нестационарных звезд проводились методами многоцветной фотометрии с целью определения физических параметров их переменности для построения физической модели (EP Lyr, CX Lyr, BD Her, RZ Lyr, V342 Her,

V733 Aql, CU Cyg и др.). Часть пластинок получена с кратной экспозицией, использовались пластинки с 15 видами фотоэмульсий.

В связи с мировыми тенденциями виртуализации астрономических архивов в 2008 году в обсерватории начаты работы по систематизации и каталогизации коллекции, а также включению данных о широкоугольных пластинках в глобальную базу данных WFPDB. На текущий момент в каталог занесены данные о почти 4.5 тыс. фотографических пластинок. В сотрудничестве с ГАО НАНУ каталог размещен в объединенной базе данных DBGRA на компьютерных мощностях ГАО, к нему организован открытый доступ с ее поисковых страниц (<http://gua.db.ukr-vo.org>), включая оцифрованные изображения пластинок.

Архивы фотографических наблюдений Симеизской обсерватории и НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И. И. Мечникова (АО ОНУ). Часть одесской коллекции снимков звездного неба, названная «старой одесской коллекцией», включает астронегативы, датируемые концом XIX века [9], и полученные позже на длиннофокусной фотографической камере («большой астрограф»), установленной на телескоп-рефракторе Кука (165-мм объектив) в цикле патрульных наблюдений. Позже были добавлены еще два инструмента: «малый астрограф», двухкамерный, установленный на телескопе Кука, и «трехкамерный астрограф», чаще называемый «ЁЖ», с короткофокусными камерами. Наблюдения на астрографах велись с применением фотоматериалов «Илфорд», «Агфа Астро», «Изоорто» размерами 13 × 18 см, 18 × 18 см и 18 × 24 см с желтым, красным фильтром и без фильтра. На пластинках получались звезды до 13.5^m. Время экспозиции было от 0.5 до 3 ч. За время работы этих трех астрографов в 1945–1957 гг. получено около 10 тыс. пластинок.

Коллекция 7-камерного астрографа: наблюдения велись с целью получения широкоугольных патрульных фотоснимков звездного неба, пригодных, в первую очередь, для поиска переменных звезд и изучения проблем звездной переменности других объектов. Для астрографа были изготовлены камеры под объективы: четыре объ-

ектива «Уран-9», два — «Фирлинзер» и один — «Тессар» ГОИ. Камеры и кассеты изготавливались под стандартные пластины размером 18×24 см. В качестве гида был применен кометоискатель Прокиша. Вначале все семь камер астрографа работали без фильтров. На 3-й, 4-й, 5-й и 6-й камерах фильтры не устанавливались, они всегда работали в системе, близкой к фотографической (pg). 12 июля 1958 г. на самые широкоугольные первую и вторую камеры ($30 \times 42^\circ$), начиная с экспозиции № 10438, и 18 июня 1965 г. на седьмую камеру ($18 \times 24^\circ$) с экспозиции № 13742 был установлен желтый фильтр. Таким образом, каждая из этих камер работала в системе, близкой к фотовизуальной (pV). Поля зрения «синих» камер — $11 \times 16^\circ$ и $13 \times 18^\circ$. Общее поле зрения астрографа около $30 \times 80^\circ$. При стандартной экспозиции 30 мин получались звезды до 12-й фотовизуальной и до 15-й фотографической звездных величин. Первая экспозиция на 7-камерном астрографе была выполнена 19 июля 1957 г. Постепенно на инструменте ввели полную программу наблюдений. В летние ночи делали до восьми экспозиций, в зимние — до четырнадцати.

Первая реконструкция астрографа, приведшая к замене старой серии на новую, проведена в апреле 1959 года. Вместо объективов «Уран-6» (3-я и 6-я камеры) поставили длиннофокусные объективы «Триплет» Цейса и «Индустар-17», что привело к удлинению этих камер вдвое. Качество получаемого материала заметно выросло — это «новая» серия. Вторая реконструкция в 1966 г. заключалась в замене объективов «Триплет» Цейса и «Индустар-17» на полученные из Симеиза более качественные объективы УНАР.

Все пластинки 7-камерного астрографа делятся на три серии: старая (1957—1959 гг.), новая (1959—1966 гг.) и третья (1966—1998 гг.) серии. Использованные эмульсии: Agfa Astro, ORWO, несенсибилизированные ZU-1, ZU-2, ZU-21 и панхроматические ZP-1 и ZP-3, что давало однородные фотометрические системы. Патрулирование звездного неба на этом инструменте завершилось в 1998 г. За все годы работы семикамерного астрографа (1957—1998 гг.) сделано 12225 экспозиций и экспонировано около 84 ты-

ся фотопластин. Основных звезд гидирования было 39, еще 75 использовались от 1 до 15 раз.

В 1966 г. была передана *симеизская коллекция* снимков малых планет, всего около 10 тыс. пластинок, экспонированных в 1909—1953 гг. в фотографической области на различных фотоматериалах (более 10 сортов фотоэмульсий) [18].

Общее количество пластинок в трех коллекциях составляет около 104 тыс. Кроме патрульных экспозиций, фотографировались сумеречные явления, кометы, астероиды, ИСЗ, квазары (например 3C 273), исследовалось оптическое проявление вспышки гамма-барстеров и др. [24, 29, 31].

База данных архива одесской коллекции астрофотонегативов. В 1990-х годах была проведена ревизия Одесской коллекции астрофотопластинок [27], позволившая создать цифровой каталог данных по основной коллекции семикамерного астрографа и разместить их в Интернете по адресу: <http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVS?5215>. Каталог содержит номер экспозиции, юлианскую и календарную даты, название звезды гидирования, продолжительность в минутах и средний момент экспозиции, фамилии наблюдателей. Другие файлы содержат список звезд гидирования с их координатами эпохи 1950.0 и количеством экспозиций данной площадки, а также список наблюдателей и количество индивидуально выполненных экспозиций. В каталог не включены дополнительные, а также специальные (непатрульные) экспозиции. Они не входят и в общее число экспонированных пластинок коллекции.

В настоящее время в Одесской обсерватории проводится систематизация данных одесской коллекции астрофотонегативов, полученных в 1957—1998 гг., для размещения в глобальном каталоге WFPDB. В перспективе для эффективного извлечения необходимой информации потребуется база данных цифровых аналогов пластинок по результатам их сканирования. Стандартное представление цифровых изображений астрофотонегативов позволит оперативно обеспечить как доступ к уникальной Одесской коллекции астрофотопластинок, так и проведение новых астрономических исследований.

Архив фотографических наблюдений Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (АО КНУ). Современное состояние архива фотографических наблюдений АО КНУ. По предварительным оценкам стеклотека АО КНУ насчитывает около 20 тыс. фотоснимков. На сегодня систематизировано в режиме первичного отождествления и частично каталогизировано около 4.5 тыс. снимков (65 % из них на стеклянных пластинках, остальные — на широкоформатных пленках). Большинство из обработанных 4500 снимков (по типам объектов наблюдений) — снимки тел Солнечной системы [13]. Для удобства каталогизации предварительно было выделено около 200 серий наблюдений, которые неравномерно распределены во временной шкале (подавляющая часть снята в период 1950—1990 гг.).

Большинство серий, кроме снимков программного объекта, включают снимки фотометрических стандартов, полученных в те же даты. В случаях экспонирования комет разными методами были получены калибровочные снимки. Большинство пластинок имеют размеры 13×18 см, 13×13 см и 16×16 см; максимальный размер пластинок — 30×30 см, минимальный (калибровочные) — 9×6 см. Присутствуют также вторичные снимки, полученные контактным методом, но их точность необходимо исследовать, как и слайды, полученные с пластинок большого размера. Удалось отождествить более 40 видов эмульсий [25].

В 2010 г. была проведена работа по приведению к стандартам IVOA части архива астронегативов КАО, полученных в период 1898—1946 гг. и имеющих историческую ценность. Сложность систематизации и каталогизации стеклотеки АО КНУ состоит в том, что в связи с двумя эвакуациями обсерватории во время войны далеко не весь стеклянный архив уцелел, поэтому для отождествления снимков с журналами наблюдений, публикациями и отчетами АО КНУ часто достаточно трудно находить соответствие; наблюдения проводились с использованием более 40 инструментов, некоторых из них уже нет; за довольно длительный период наблюдений (1898—1996 гг.) много раз изменялась форма

информационных записей, поэтому некоторые важные данные наблюдений не поддаются расшифровке; не все журналы наблюдений сохранились.

АРХИВЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ

Архив Радиоастрономического института НАН Украины по спектральным данным для внегалактических радиоисточников. Основная наблюдательная программа на радиотелескопе УТР-2 (Радиоастрономическая обсерватория им. С. Я. Брауде, РИНАНУ) — получение каталога дискретных радиоисточников Северного неба — осуществляется с 1972 г. по настоящее время. Крупнейший в мире телескоп УТР-2, работающий в декаметровом диапазоне длин волн, позволяет проводить одновременные наблюдения на шести частотах (10, 12.6, 14.7, 16.7, 20, 25 МГц) с высокой чувствительностью (пороговая плотность потока на частоте 25 МГц составляет 10 Ян , т. е. $10^{-25} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$). Используя данные измерений в декаметровом диапазоне на радиотелескопе УТР-2 и применяя абсолютные сопоставимые шкалы плотностей потоков, приведенные различными обсерваториями, можно построить спектры источников в диапазоне частот от 10 до 5000 МГц. Радиоспектр — зависимость плотности радиопотока S_ν от соответствующей частоты ν (в МГц) в логарифмическом масштабе ($S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, где α — спектральный индекс) — является важной физической характеристикой внегалактического источника. Исследуя характер спектра излучения источника в широком диапазоне частот, можно изучать физические условия в самом источнике и в среде распространения радиоволн. По данным, полученным в каталоге УТР-2 для внегалактических источников (Граковский каталог (GR)), оказалось, что около 80 % спектров — линейные (S-тип), около 10 % — с положительной кривизной (тип C⁺), и около 10 % — с отрицательной кривизной (тип C⁻). В каталоге УТР-2, представленном на сайте Радиоастрономического института НАН Украины (<http://www.ri.kharkov.ua/decameter/utr2/index.html>), указаны не только координаты, плотности радиопотоков наблюдаемых в декаметровом диапазоне внегалактических источников, но

также их соответствующие низкочастотные спектральные индексы.

К настоящему времени составлен наиболее полный в декаметровом диапазоне каталог внегалактических источников Северного неба (около четырех тысяч объектов), продолжаютсся дальнейшие наблюдения на радиотелескопе УТР-2 и обработка полученных данных [2, 18–22].

Архив ПЗС-наблюдений НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория». Аксиальный меридианный круг (АМК, <http://www.mao.nikolaev.ua/NN/index.html>). Наблюдения с помощью приборов с зарядовой связью (ПЗС) были начаты в 1996 г. В 1996–1998 гг. на АМК выполнялись регулярные наблюдения с целью уточнения положений звёзд в площадках вокруг 188 внегалактических радиоисточников. Наблюдения велись в режиме переноса заряда полосами $8 \times 60'$ [14, 15].

В 2002 г. на АМК проводились наблюдения звёзд в узкой экваториальной зоне от -7.5 до 7° с 5-кратным перекрытием полос размером $24' \times 3'$ с целью получения положений звёзд $10\text{--}15^m$ и создания опорного каталога для обработки наблюдений искусственных геостационарных спутников. С 2003 по 2005 гг. на АМК проводились наблюдения зоны эклиптики длинными полосами размером $24' \times 4.5^\circ$ (2003 г.) и $24' \times 7.5^\circ$ (2004–2005 гг.) с целью создания каталога звёзд в протяженных астрометрических калиброванных площадках вокруг внегалактических радиоисточников [12].

В 2008 г. была продолжена программа наблюдений зоны эклиптики с целью получения астрометрических параметров звёзд в протяженных астрометрических калиброванных площадках. Зона наблюдений была распространена на 53 площадки размером $1 \times 7.5^\circ$, состоявшие из серий по 16 кадров размером $24 \times 26'$, полученных в режиме переноса заряда. Площадки расположены достаточно равномерно в зоне склонений $\pm 10^\circ$ от эклиптики. Также наблюдались отдельные площадки $24 \times 26'$, в которых расположены звёзды с большими собственными движениями.

Общее количество полученных кадров за все годы наблюдений на АМК составляет около 22 тысяч.

Мультиканальный телескоп (МКТ или Зонный астрограф) (http://www.mao.nikolaev.ua/ukr/mkt_u.html). Регулярные ПЗС-наблюдения звёзд и тел Солнечной системы с помощью зонного астрографа начались в 2000 г. К 2005 г. выполнялись следующие программы:

- наблюдение избранных малых планет с целью улучшения их орбит и определения масс; наблюдения астероидов сближающихся с Землёй (АСЗ);
- фотометрические наблюдения малых планет и спутников больших планет;
- наблюдение близких космических объектов с высотами (400 — 34 000) км для уточнения их координат и фотометрических параметров;
- наблюдения ярких внегалактических радиоисточников до 15^m .

Наблюдения велись в кадровом режиме и в режиме с переносом заряда с размером поля $28 \times 31'$. Общее количество полученных кадров за все годы наблюдений на МКТ составляет около 1 тысячи.

Скоростной автоматический комплекс (САК) [http://www.mao.nikolaev.ua/ukr/sak_u.html]. Регулярные ПЗС-наблюдения звёзд, тел Солнечной системы и искусственных спутников Земли с помощью телескопа САК начались в 2005 г.

В 2007–2008 гг. выполнялась программа наблюдений зоны эклиптики с целью получения астрометрических параметров звёзд в протяженных астрометрических калиброванных площадках. С 2005 г. ведутся регулярные наблюдения искусственных спутников Земли на разных орбитах. При этом используется комбинированный метод наблюдений [10].

В 2010 г. была проведена работа по созданию общего формата текстового файла, содержащего полную информацию о ПЗС-наблюдениях с телескопами обсерватории. Такой формат был создан и принят в качестве приложения к Техническому заданию на разработку научного полигона УкрВО на основе баз данных ГАО НАНУ и НИИ НАО. После этого была проведена работа по компиляции такого файла. Общее количество полученных кадров за все годы наблюдений, вошедших в состав первой версии архивного файла, — около 23 тысяч.

Архив ПЗС-наблюдений ГАО НАН Украины.

Массовые ПЗС-наблюдения ГАО НАН Украины и АО КГУ начаты в 2001 г. после установки на МАК ГАО НАН Украины ПЗС-матрицы с виртуальной фазой ISD017AP. Матрица имела 1040×1160 пкл, размер пикселя 16×16 мкм, темновой сигнал $7e/\text{пкл}/\text{с}$, шум считывания 18 электронов. Характеристики киевского меридианного аксиального круга: входное отверстие — 180 мм, фокусное расстояние — 2335 мм, фотометрическая полоса — V (Johnson), масштаб — $1.394''/\text{пкл}$, предельная звездная величина — $V = 17^m$. Режимы работы: кадровый и накопления сигнала с синхронным переносом зарядовых пакетов (кадровый режим: размер кадра — $24.2 \times 28'$, экспозиция — 0.01—1000 с; режим синхронного накопления: размер скана по склонению — $24.2'$, длительность экспозиции звезд — 108secδ с.

С 2001 по 2003 гг. на МАК проводились наблюдения звезд в площадках с радиоисточниками — объектами ICRF с целью создания опорного астрометрического каталога КМАС1 звезд до $V = 17^m$ в направлении на внегалактические радиоисточники. Список программы включал 192 внегалактических радиоисточника из каталога GAOUA99C03 в зоне склонений $0^\circ \dots +30^\circ$. Площадки получены в режиме сканирования и имеют угловой размер $24'$ по склонению и $46'$ по прямому восхождению.

В 2003 г. завершились начатые в 2001 г. ПЗС-наблюдения на МАК звезд в полях с радиоисточниками — объектами ICRF. Получен большой массив наблюдений звезд экваториальной зоны. В наблюдательный список программы были включены 209 внегалактических радиоисточников (ERS) из каталога GAOU99C03, расположенных в зоне склонений $0^\circ \dots +30^\circ$, и звезды экваториальной зоны от 0° . Всего со стеклянным V-фильтром получены звездные поля для 192 ERS при 4—10 наблюдениях каждого поля (всего 1184 видеокadra). Каждая площадка з ERS наблюдалась от 5 до 10 раз, в среднем — шесть раз. Звездные поля, полученные в режиме сканирования, имеют номинальный угловой размер $24'$ (склонение) \times $46'$ (прямое восхождение), что соответствует 1040×2000 пкл ПЗС. Средняя плотность объектов

на площадке 577 звезд. Наименьшее количество звезд на площадку составляет 115, наибольшее — 4922. Предельная звездная величина $V = 17$.

ПЗС-кадры с радиоисточниками сохраняются на компакт-дисках. Общий объем архива составляет около 5.5 Гбайт и содержит почти 800 тыс. изображений звезд.

В 2003 г. начата долговременная наблюдательная программа звезд в экваториальной зоне ($\delta = 0^\circ \dots +5^\circ$) с 4-кратным перекрытием сканов [11]. Программа имеет целью расширение опорной системы HIPPARCOS — «Tycho» на звезды до $V = 17^m$, получение их фотометрических характеристик и определение собственных движений. В рамках этой программы уже получено около 14 тыс. ПЗС-кадров с почти 6 млн звездных изображений.

По результатам наблюдений на МАК в 2001—2003 гг. создан ПЗС-каталог КМАС1, содержащий положения, собственные движения и фотометрические величины B, V, R, r', J для 100 тыс. звезд в полях с объектами ICRF. Ошибка положений по внутренней сходимости составляет 30—50 мсд (миллисекунды дуги), а по внешней, при сравнении с SMC13 и UCAC2, 40—70 мсд для звезд $V < 14^m$. Ошибка фотометрических V -данных равна 0.05—0.07^m для звезд $V < 14^m$. Для более слабых соответствующие оценки составляют 160 мсд, 200 мсд и 0.1^m.

В 2009 г. на Киевском МАК была установлена новая ПЗС-камера Apogee Alta U47. ПЗС-матрица e2v CCD47-10 камеры Apogee Alta U47 имеет формат 1024×1024 пкл с размером пикселя 13×13 мкм. Наблюдения проводятся в режиме синхронного накопления сигнала (scan-drift mode) с эффективным временем экспозиции 77 с для экваториальной области. По результатам тестовых наблюдений с новой камерой в 2009 г. получены ошибки положений и V -величин соответственно 100 мсд и 0.09^m для звезд каталога «Tycho-2». Диапазон наблюдаемых звездных величин удалось расширить с 11.5—17^m до 8.5—17^m. Кадровый режим работы ПЗС-камеры: размер кадра $19.3 \times 19.3'$, экспозиция — 20 мс — 183 мин. Режим синхронного накопления: размер скана по склонению — $19.3'$, экспозиция — 77secδ с.

С новой камерой продолжаются наблюдения по долговременной программе [11].

Таким образом, на текущий момент ПЗС-архив ГАО НАН Украины составляет около 16 тыс. ПЗС-кадров, полученных с 2001 по 2003 гг. в экваториальной зоне неба. Эти кадры сохраняются на CD-носителях, не систематизированы и не каталогизированы. С 2009 г. этот архив пополняется новыми наблюдениями в той же зоне. В связи с началом активных наблюдений возникла необходимость создания соответствующей базы данных ПЗС-наблюдений, а также средств ее администрирования и оперативного пополнения новыми поступлениями. Кроме того, в ПЗС-архив ГАО начали поступать кадры наблюдений площадок с переменными звездами (более 100 кадров), полученные в 2010 г. астрономами ГАО на телескопах других обсерваторий в режиме как собственных, так и удаленных наблюдений. Эти кадры на текущий момент также требуют систематизации и каталогизации.

Архив ПЗС-наблюдений ОНМУ. На кафедре «Высшая и прикладная математика» Одесского национального морского университета имеется архив ПЗС-наблюдений, полученных сотрудниками (Н. А. Вирнина, В. В. Бреус) на различных обсерваториях (Обсерватория Цек Маун, США; Астрономическая обсерватория и планетарий в г. Плоговец, Словакия; Астрономическая обсерватория и планетарий в Байя, Венгрия, а также А. В. Баклановым в 2004 г. в Астрономической обсерватории и планетарии острова Майорка, Испания) во время исследования переменных звезд по международной программе «Inter-Longitude Astronomy» («Междолготная астрономия») [16].

Основными объектами исследований являются катаклизмические переменные звезды (эволюция вращения магнитных белых карликов в промежуточных и асинхронных полярах (В. В. Бреус), асимметрия взаимодействующих двойных звезд (Н. А. Вирнина)) и взаимодействующие двойные системы других типов, в окрестностях которых, в дополнение к основной программе наблюдений, были открыты новые переменные звезды. Кроме того, поиск новых переменных звезд проводился в специально вы-

бранных площадках, в том числе по программе с условным названием «Цесевиц». Более всего новых переменных звезд — более 50 — открыла, исследовала и классифицировала Н. А. Вирнина.

Для ряда объектов, наблюдения проводятся в режиме попеременно сменяющихся фильтров *VRVR*. Для двухцветной (и многоцветной) фотометрии генерируются ряды квазиодновременных наблюдений с использованием локальной кубической интерполяции. Для улучшения точности фотометрии применяется алгоритм «искусственной» звезды сравнения. Эти и другие алгоритмы реализованы в программе *MCV* [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объединенный цифровой архив (ОЦА) астрономических наблюдений обсерваторий Украины должен аккумулировать отформатированные согласно требованиям общих стандартов по форматированию входных данных локальные наблюдательные архивы, накопленные в отдельных астрономических группах — владельцах коллекций фотографических и ПЗС-наблюдений. Необходимость установления таких стандартов вызвана существенным разнообразием наблюдательных данных и различным состоянием готовности локальных архивов к включению в процедуру объединения.

На текущий момент двумя обсерваториями — участниками проекта УкрВО (ГАО НАН Украины и Николаевской АО) — были разработаны и согласованы предварительные стандарты входных текстовых файлов, содержащих верифицированные данные локальных архивов в стандартизованном виде и готовые к процедуре автоматической обработки и занесения в базу данных ОЦА. Это стало возможным благодаря тому, что обе обсерватории используют аналогичные программные средства для хранения своих архивов (реляционную базу данных *MySQL* и скриптовый язык программирования *PHP*). И хотя структура самих локальных архивов отличается, согласованность форматов представления данных обеспечила возможность взаимного обмена данными архивов и создания совместных баз данных, которые способны работать в рамках локальных интерфейсов систем управления архивами.

Такая связь на данном этапе развития проекта может быть реализована в двух вариантах.

1. Перенесение однотипно представленных данных на вычислительные мощности каждого из участников проекта и раздельное администрирование локально объединенных архивов; в этом случае возникает проблема мониторинга и поддержки соответствия данных во всех локально объединенных архивах, что в условиях значительного количества участников может стать достаточно проблемным моментом, если учитывать большие объемы информации оцифрованных архивов, которые должны будут размещаться на серверах участников. Преимуществом этого способа является отсутствие строгих требований к поддержанию единой программной архитектуры локального цифрового архива (ЛЦА), упрощенность организации и скорость поиска данных, поскольку процедура выполняется в пределах одного сервера и не выдвигает высоких требований к скорости каналов передачи данных.

2. Раздельное администрирование отдельных архивов с организацией связи с удаленными архивами с помощью перекрестных ссылок и раздельных запросов к разнесенным локальным базам данных. Преимущества этого способа состоят в отсутствии необходимости мониторинга соответствия данных в ЛЦА, поскольку данные отдельных ЛЦА не пересекаются, возможности оперативного наращивания объемов информации в

отдельном ЛЦА с непосредственным немедленным доступом к добавленным данным с поисковыми интерфейсами любого из участников проекта. Такой способ организации требует строгого поддержания подобия программной архитектуры ЛЦА, высокой скорости передачи данных в каналах связи для реализации быстрого совместного поиска в удаленных ЛЦА и меньшей ёмкости средств хранения оцифрованной информации.

Альтернативой обоим вариантам может стать организация ОЦА не на вычислительных мощностях обсерваторий-участников, а в едином профессионально организованном компьютерном дата-центре УкрВО (что не исключает возможности организации его зеркал на других компьютерных ресурсах), на мощностях, выделенных с учетом специфических требований проекта к хранилищам данных, каналам связи, программному обеспечению, техническому обслуживанию и поддержке.

В настоящее время прототип ОЦА на материалах двух обсерваторий обрабатывается по первому варианту объединения данных. Согласованы стандарты обмена данными как для фотографических, так и для ПЗС-архивов. Обсерватории-участники раз в полгода осуществляют взаимный обмен содержимым своих баз данных, отформатированным согласно этим стандартам. В обмен не включены данные оцифровки, поскольку именно они являются наиболее объем-

Таблица 4. Архивы других участников проекта УкрВО в прототипе ОЦА на ресурсах ГАО НАН Украины и НАО

| Идентификатор инструмента | Местонахождение архива; место наблюдений | Номер по Марсдену; тип негативов; часовая зона | Долгота; широта; высота места наблюдений, м | Количество труб, апертура; [диаметр зеркала, м] | Фокус, м; [масштаб, "/мм]; рабочее поле, град | Период действия; число прямых снимков; оценка /в БД |
|-----------------------------------|---|--|---|---|---|---|
| LAO010 Zeiss 50/10 [камера] | Львов, Украина; АО ЛНУ | 067 стекло 3 | 23 57 49 55 359 | 10 | 0.5 [412] 1 | 1939—1976 8500/4036 |
| МУК012 ZZA [астрограф] | Николаев, Украина; НАО, Николаев, Украина | 089 стекло 2 | 31 58.5 46 58.3 83 | 12 | 2.04 [101] 5 | 1961—1999 8209/8209 |
| PUL012 ZZA [астрограф] | Николаев, Украина; ГАО, Пулково, Россия | 084 стекло 3 | 30 19.6 59 56.3 75 | 12 | 2.04 [101] 5 | 1929—1931 196/196 |

Примечание: ZZA – Зонный астрограф Цейса, Николаевская АО, Украина; Zeiss 50/10 – Камера з объективом триплетом Цейса, АО ЛНУ, Львов, Украина

ной частью ЛЦА, и ни одна из обсерваторий не имеет накопителей соответствующих размеров для хранения совместного архива оцифрованных изображений. Поэтому для организации совместного доступа к оцифрованным изображениям реализуется второй вариант связи, построенный на согласованной структуре хранения и наименования единиц хранения таким образом, что по данным пластинки программно может быть получен путь к ее оцифрованному изображению в удаленном архиве.

Табл. 3 и 4 содержат перечни наблюдательных архивов, включенных в прототип ОЦА, администрируемых на ресурсах ГАО НАН Украины и Николаевской АО, которые доступны через их поисковые интерфейсы.

Создание ОЦА по первому варианту, кроме упомянутых выше преимуществ, дает возможность тем участникам проекта, которые не имеют достаточных ресурсов (человеческих, материальных и вычислительных), плодотворно сотрудничать, организуя свои ЛЦА на ресурсах других обсерваторий, что значительно ускоряет процесс их присоединения к общим базам данных и архивам. Первой пробой организации такого сотрудничества стало присоединение уже каталогизированной части архива стеклотеки АО ЛНУ (4 тыс. пластинок — около 50 % всего архива АО ЛНУ) к базе данных ГАО НАН Украины в тестовом режиме для изучения целесообразности и возможности постоянной публикации архива АО ЛНУ на площадке ГАО в составе объединенной БД по общему согласию сторон-участниц. В настоящий момент общее количество записей в базе данных составляет 38 783 пластинки в 29 наблюдательных архивах.

Работа была выполнена в рамках проекта Украинской астрономической ассоциации «Создание базы данных астронегативов УкрВО» (2010 г.), за что авторы выражают свою благодарность академику НАН Украины Я. С. Яцкиву. Наша искренняя признательность редколлегии журнала «Космическая наука и технология» за публикации материалов по УкрВО, что очень важно для развития этого проекта в Украине.

1. Андронов И. Л., Бакланов А. В. Алгоритм искусственной звезды сравнения для ПЗС фотометрии // *Вісник астрономічної школи.* — 2004. — 5, № 1–2. — С. 264–272.
2. Брауде С. Я., Мирошниченко А. П., Рашковский С. Л. и др. Декаметровый обзор дискретных источников северного неба. XIII. Спектры дискретных источников для интервала склонений 30° – 40° // *Кинематика и физика небес. тел.* — 2003. — 19, № 4. — С. 291.
3. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Процюк Ю. И. Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Цель, структура и задачи // *Космічна наука і технологія.* — 2010. — 16, № 5. — С. 62–71.
4. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Сергеева Т. П. и др. Украинская виртуальная обсерватория: состояние и перспективы развития // *Тез. докл. на ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, Россия, 12–19 сентября 2010 г.* — Нижний Архыз, 2010. — С. 150.
5. Горель Г. К., Гудкова Л. А. Положения 19 избранных малых планет в системе ICRS по наблюдениям на Николаевском зонном астрографе в 1961–1997 гг. // *Кинематика и физика небес. тел.* — 2000. — 16, № 5. — С. 463–469.
6. Гудкова Л. А. Согласование каталожных и динамических систем координат по наблюдениям избранных малых планет в Николаевской обсерватории: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Николаев, 2001. — 124 с. — Машинопись.
7. Иванцов А. В. Определение масс больших астероидов на основе наземных позиционных наблюдений: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Николаев, 2007. — 199 с. — Машинопись.
8. Калихевич Ф. Ф. Установка и исследование зонного астрографа в Николаеве. Первые результаты наблюдений планет: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Николаев, 1970. — 144 с. — Машинопись.
9. Карамыш В. Ф. Семикамерный астрограф // *Страницы истории астрономии в Одессе: Сб. в 4-х частях.* — Одесса: Астропринт, 1997. — Ч. 4. — С. 19–25.
10. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околосемном космическом пространстве // *Околосемная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы.* — М.: ИНАСАН, 2000. — С. 361–371.
11. Лазоренко П., Карбовський В., Денисюк О. та ін. Київський меридіанний аксіальний круг з ПЗ3-камерою // *Кинематика и физика небес. тел.* — 2007. — 23, № 5. — С. 304–311.
12. Майгурова Н. В. Уточнение связи оптической и радио систем координат по ПЗС-наблюдениям избранных внегалактических радиоисточников в оптическом

- діапазоні: Дис... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 2006. — Машинопись.
13. *Погорельцев М. Т.* Стеклоотека астронегативів астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка // Вісник Київ. нац. ун-та. Астрономія. — 2005. — Вип. 41-42. — С. 101—102.
 14. *Процюк Ю. И.* Теоретические и методические основы наблюдений и их обработки на автоматическом меридианном телескопе горизонтального типа: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2000. — 132 с. — Машинопись.
 15. *Шульга А. В.* Определение положений небесных объектов до 15 звездной величины из наблюдений на аксиальном меридианном круге Николаевской астрономической обсерватории: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2000. — 125 с. — Машинопись.
 16. *Andronov I. L., Antoniuk K. A., Baklanov A. V., et al.* Inter-Longitude Astronomy (ILA) Project: Current Highlights And Perspectives. I. Magnetic vs. Non-Magnetic Interacting Binary Stars // *Odessa Astron. Publs.* — 2010. — 23. — P. 8—10.
 17. *Bondar N. I.* Wide-Field Plate Archive of the Crimean Astrophysical Observatory // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.* — 1999. — 95. — С. 195.
 18. *Braude S. Ya., Megn A. V., Rashkovski S. L., et al.* Decametric survey of discrete sources in the Northern Sky. II. Source catalogue in the range of declinations $+10^\circ$ to $+20^\circ$ // *Astrophys. and Space Sci.* — 1978. — 54. — P. 37.
 19. *Braude S. Ya., Megn A. V., Sokolov K. P., et al.* Decametric survey of discrete sources in the Northern Sky. V. Source catalogue in the range of declinations 0° to $+10^\circ$ // *Astrophys. and Space Sci.* — 1979. — 64. — P. 73.
 20. *Braude S. Ya., Miroshnitchenko A. P., Sokolov K. P., Sharykin N. K.* Decametric survey of discrete sources. VII. Source catalogue in the range of declinations -2° to -13° // *Astrophys. and Space Sci.* — 1981. — 74. — P. 409.
 21. *Braude S. Ya., Miroshnitchenko A. P., Sokolov K. P., Sharykin N. K.* Decametric survey of discrete sources. VIII: Spectra of discrete sources in the range 12.6 to 1400 MHz for declinations -2° to -13° // *Astrophys. and Space Sci.* — 1981. — 76. — P. 279.
 22. *Braude S. Ya., Sokolov K. P., Zakharenko S. M.* Decametric survey of discrete sources in the Northern Sky. XI. The results of the UTR-2 very low-frequency sky survey in the declination range 41° to 52° // *Astrophys. and Space Sci.* — 1994. — 213. — P. 1.
 23. *Tsvetkova K., Tsvetkov M.* Catalogue of Wide-Field Plate Archives: Version 5.0 // *Virtual Observatory, Plate Content Digitization, Archive Mining, Image Sequence Processing* / Eds M. Tsvetkov, V. Golev, F. Murtagh, R. Molina. — Sofia, Heron Press Sci. Ser., 2006. — P. 45—53.
 24. *Karetnikov V. G., Markina A. K., Somikov V. P.* The Odessa Sky Patrol Plate Collection // *Lecture Notes in Phys.* — 1995. — 454. — P. 407. — (Flares and Flashes: Proc. IAU Coll. 151 / Eds J. Greiner, et al. — Berlin etc.: Springer, 1995).
 25. *Kazantseva L. V.* Photographic plate archive of the Kyiv University Astronomical Observatory // *PDPP Newsletter (IAU Working Group Preservation and Digitization of Photographic Plates).* — 2006. — N 4. — P. 32—33.
 26. *Sergeeva T., Golovnya V., Yizhakevych O., et al.* MAO NAS of Ukraine plate archives: Towards the WFPDB integration // *Virtual Observatory, Plate Content Digitization, Archive Mining, Image Sequence Processing* / Eds M. Tsvetkov, V. Golev, F. Murtagh, R. Molina. — Sofia, Heron Press Sci. Ser., 2006. — P. 124—128.
 27. *Pikhun A. I., Yushchenko A. V.* Machine readable catalog of Odessa patrol plates // *Inform. bull. on variable stars (IBVS).* — 2002. — N 5215.
 28. *Sergeeva T. P., Sergeev A. V., Pakulyak L. K., Golovnya V. V.* Wide field plate archive of MAO NAS of Ukraine: electronic plate collection // *Baltic Astronomy.* — 2004. — 13, N 4. — P. 677—682.
 29. *Tsesevich V. P., Romanov Yu. S., Chuprina R. I., Murnikov B. A.* Collection of Odessa Astronomical Observatory plates of the stellar sky fields // *Abastumani Astrophys. Observatory Bulletin.* — 1989. — 67. — P. 97—100.
 30. *Tsvetkova K. P., Tsvetkov M. K., Sergeeva T. P., Sergeev A. V.* Wide-Field Plate Archives Stored in the Ukrainian Observatories // *Кинематика і фізика небес. тел.* — 2009. — 25, № 5. — С. 402—412.
 31. *Yushchenko A. V., Karetnikov V. G., Chakhrukhanov O. C., et al.* Plate archive of Odessa Observatory scanning project // *Acta Historica Astronomiae.* — 1999. — 6. — P. 74—76.

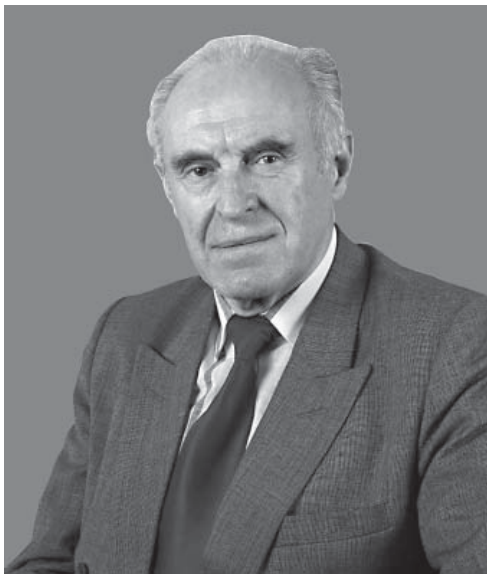
Надійшла до редакції 21.01.11

I. B. Vavilova, L. K. Pakuliak, Yu. I. Protsyuk, N. V. Virun, A. A. Shlyapnikov, S. G. Kashuba, A. I. Pikhun, S. M. Andrievsky, A. E. Mazhaev, L. V. Kazantseva, A. V. Shulga, A. V. Zolotukhina, T. P. Sergeeva, A. P. Miroshnichenko, I. L. Andronov, V. V. Breus, N. A. Virnina

UKRAINIAN VIRTUAL OBSERVATORY (UkrVO). CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS FOR THE JOINT ARCHIVE OF OBSERVATIONS

The current state of the observational data archives of seven observatories of Ukraine which were created from 1898 to 2010 is considered in respect to their suitability for including into the Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO) database. In accordance with a current UkrVO conception approved by the Ukrainian Astronomical Association, the database of astronegatives is the main scientific component of the UkrVO. The database will include all the photoplates accumulated in Ukraine and combine them into the Joint Digitized Archive (JDA). This will provide for a user an easy access to textual data and images using web interface and a corresponding search engine. The data archives obtained from CCD and radio observations in Ukraine are also discussed as scientific components of the UkrVO. Some prospects of the JDA development are formulated.

До 80-річчя від дня народження академіка НАН України В. І. ЛЯЛЬКА



Відомому вченому в галузі аерокосмічних досліджень Землі, геології, гідрогеології, геоєкології, геотермії, директору Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, лауреату Державних премій України в галузі науки і техніки (1989, 2004) та премії ім. В. І. Вернадського НАН України (1986), заслуженому діячеві науки і техніки України (1997), докторові геолого-мінералогічних наук (1972), професору (1986), академіку НАН України (2010), члену-кореспонденту Міжнародної академії астронавтики Вадиму Івановичу Ляльку 1 вересня 2011 р. виповнюється 80 років.

В. І. Лялько народився у м. Переяслав-Хмельницькому Київської області в родині службовців. Після закінчення з відзнакою у 1955 р. геологічного факультету Київського державного університету ім. Т. Г. Шевченка він вже 55 років працює у Національній академії наук України: до 1992 р. у Інституті геологічних наук (ІГН)

АН УРСР, де пройшов шлях від інженера відділу гідрогеології до завідувача відділу тепломасопереносу в земній корі. В 1974—1978 рр. — заступник академіка-секретаря, в. о. академіка-секретаря Відділення наук про Землю АН УРСР. Член Бюро Відділення наук про Землю НАН України.

У 1964 р. ювіляр захистив кандидатську дисертацію на тему «Формирование, оценка и прогноз изменения ресурсов подземных вод в условиях засушливой зоны Украины», де вперше застосував новий фізико-математичний напрям — тепловологоперенос у капілярно-пористих середовищах, у 1972 р. — докторську дисертацію на тему «Исследование особенностей тепло- и массопереноса в подземных водах юго-запада Русской платформы и сопредельных регионов». Вчене звання професора присуджено у 1986 р. У 1992 р. він обраний членом-кореспондентом АН України, а у 2010 р. — академіком НАН України.

Своїми багаторічними дослідженнями вчений зробив суттєвий внесок у розвиток світової геологічної науки. Діапазон його наукових інтересів надзвичайно широкий — аерокосмічні дослідження Землі, геологія, гідрогеологія, геоєкологія, геотермія.

Фундаментальні дослідження, здійснені В. І. Ляльком особисто та під його керівництвом, дозволили обґрунтувати новий напрям у науках про Землю — енергомасообмін у геосистемах, який розвивається в рамках оригінальної наукової школи, що досліджує процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні і біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів та є дуже чутливими до дії різних природних та антропогенних факторів. На базі спектральних моделей розробляються нові методи і технології тематичного оброблення даних дистанційного зондування Землі.

Науковцем успішно вирішено ряд фундаментальних питань, пов'язаних з теоретико-методичним обґрунтуванням і практичним випробуванням у виробничих умовах нових методів в аерокосмічному землезнавстві

(радарна інтерферометрія, гіперспектрометрія та ін.). Це сприяло розв'язанню актуальних природоресурсних і природоохоронних задач (аерокосмічних пошуків нафтогазових покладів, контроль і прогнозування врожайності сільськогосподарських культур, пожежонебезпечності лісів, підтоплення територій, паводків, екологічного стану територій і акваторій, оцінки опускань земної поверхні в районах закриття вугільних шахт та ін.).

В особі Вадима Івановича органічно поєднані кращі якості вченого та організатора науки, який ефективно впроваджує свої розробки у виробництво. Ним опубліковано близько 500 праць, серед яких 25 монографій, а також підготовлено багато кандидатів та докторів наук.

В. І. Лялька веде велику організаційну та педагогічну роботу. Він — голова Наукової ради НАН України з вивчення природних ресурсів дистанційними методами та Секції з дистанційного зондування Землі Ради з космічних досліджень НАН України, голова спеціалізованої вченої ради при ЦАКДЗ ІГН НАН України із захисту докторських та кандидатських дисертацій зі спеціальності «Аерокосмічні дистанційні дослідження», член Наук. рад НАН України та РАН з проблем біосфери, космічних та системних досліджень, заступник редактора «Геологічного журналу» та журналу «Геоінформатика», член редколегії журналу «Космічна наука і технологія», науковий керівник проекту дослідження природних ресурсів аерокосмічними засобами в межах Національної космічної програми України. Вчений є координатором ВНЗ НАН України у проекті від України («GMES-GEOSS-Україна») до Міжнародної програми «Глобальна система систем обстеження Землі» (GEOSS) та Європейської програми «Глобальний моніторинг для навколишнього середовища та безпеки» (GMES), в якому задіяні установи Відділення наук про Землю НАН України у співдружності з іншими відділеннями НАН України та з установами НКАУ і зарубіжними співкооперативами. В. І. Лялька бере активну участь в міжнародній науковій діяльності, про що свідчать його неодноразові виступи на міжнародних наукових форумах, публікації в зарубіжних наукових виданнях та виграні гранти Міжнародного наукового фонду та космічних агентств Німеччини, Франції, Європи та ін.

Діяльність В. І. Лялька відзначена рядом нагород: орденом «За заслуги» III ступеня, почесними відзнаками — «За наукові досягнення» НАН України, «За заслуги в розвідці надр» Геологічної служби України, «Золотим знаком» Спілки геологів України, «Почесний працівник космічної галузі України» та ін.

У рік свого 80-річчя та 55-річчя наукової діяльності ювіляр, як і завжди, багато і плідно працює, перетворюючи у реальні досягнення ті наукові напрацювання, яким він присвятив своє життя.

Усім, кому доводилося спілкуватися з вченим, відома його цілеспрямованість, ерудованість, вміння проводити дослідження на сучасному науковому рівні і доводити їх

до практичних результатів. Широкий кругозір, почуття гумору, принциповість, реальна допомога тим, хто її потребує, — ось риси, притаманні вченому.

Деякі публікації ювіляра

Calculation of Heat and Mass Transfer in the Earth's Crust (Algorithms and Programs) / Publish. US Depart. of Interior and the National Science Found. Washington, D.C. Amering Publ. Co., — New York — New Delhi, 1981. — 150 p.

Геологія шельфу України. Тверді корисні копалини / Співавт. Є. Ф. Шнюков, Ю. І. Інзезмцев, В. М. Подорван та ін. — К.: Наук. думка, 1983. — 170 с.

Космическая информация в геологии / Соавт. М. М. Митник, Л. Д. Вульфсон, В. Г. Трифионов и др. — М.: Наука, 1985. — 560 с.

Тепломассоперенос в литосфере. — К.: Наук. думка, 1985. — 260 с.

Аерокосмічні методи у геоєкології / Співавтори Л. Д. Вульфсон, В. Ю. Жарий та ін. — К.: Наук. думка, 1992. — 206 с.

Нові методи в аерокосмічному землезнавстві / Співавтори О. Д. Федоровський, В. М. Перерва, Ю. В. Костюченко та ін. — К.: ЦАКДЗ-Карбон, 1999. — 263 с.

Термодинамическая модель эволюции астенолитов / Соавторы А. В. Чекунов, Р. И. Кутас, М. М. Митник // Геофиз. журн. — 1993. — 13, № 4. — С. 3—12.

Україна з космосу (Атлас комп'ютерно дешифрованих космознімків) / Співавтори О. Д. Федоровський, О. Д. Рябоконтенко, О. І. Сахацький та ін. // Космічна наука і технологія. Додаток. — 1997 (1-е вид.); 1999 (2-е вид.). — 58 с.

Космос — Україні: Атлас комп'ютерно дешифрованих космознімків / Ред. і співавтори О. Д. Федоровський та ін. — К.: НАНУ-НКАУ, 2001. — 109 с.

Аерокосмічні дослідження Землі: тенденції і перспективи / Ред. і співавтор В. І. Лялька // Космічна наука і технологія. — 2002. — 8, № 2/3. — 206 с.

Інформатизація аерокосмічного землезнавства / Ред. і співавтор С. О. Довгий. — К.: Наук. думка, 2001. — 606 с.

Водообмен в гидрогеологических структурах Украины / Соавторы В. М. Шестопалов и др. — К.: Наук. думка, 1998—2001. — Т. 1—4. — 1461 с.

Словник із дистанційного зондування Землі / За ред. чл.-кор. НАН України В. І. Лялька та М. О. Попова. — К.: СПМ «АВЕРС», 2004. — 170 с.

Державний стандарт ДСТУ 4220-2003 «Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять». — К.: Держспоживстандарт України, 2003. — 18 с.

Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / Ред. В. І. Лялька та М. О. Попов. — К.: Наук. думка, 2006. — 356 с.

Изменения земных систем в Восточной Европе / Отв. ред. В. И. Лялька. — К.: Формант, 2010. — 582 с.

АНДРІЄВСЬКИЙ Сергій Михайлович — завідувач кафедри астрономії і директор Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — змінні зорі, зоряна хімічна еволюція, архіви астрономічних даних.

АНДРОНОВ Іван Леонідович — завідувач кафедри вищої і прикладної математики Одеського національного морського університету, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — змінні зорі, математичні засоби обробки астроінформації, архіви і бази астрономічних даних.

БАРАБАШ Володимир Володимирович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — геофізика, вертикальне зондування іоносфери.

БОНКАЛА Ярослав (BAKALA Jaroslaw) — провідний фахівець з конструювання та дизайну відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук.

Напрямок науки — механіка, матеріалознавство та компоненти для використання у космічних дослідженнях.

БРЕУС Віталій Віталійович — асистент кафедри вищої і прикладної математики Одеського національного морського університету, аспірант.

Напрямок науки — змінні зорі.

БАВИЛОВА Ірина Борисівна — завідувачка лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, математичні методи розпізнавання та обробки даних, каталоги і бази даних небесних об'єктів, історія астрономії.

ВІРНІНА Наталія Альбертівна — асистент кафедри вищої і прикладної математики Одеського національного морського університету, аспірант.

ВІРУН Наталія Володимирівна — молодший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені І. Франка.

Напрямок науки — штучні супутники Землі (спостереження та обробка даних).

ГБУРЕК Шимон (GBUREK Szymon) — науковий співробітник відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, кандидат наук.

Напрямок науки — фізика Сонця.

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

Напрямок науки — інформаційні технології.

ДУДНИК Олексій Володимирович — завідувач відділу космічних досліджень Харківського національного університету ім. В. М. Каразіна, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика космічних променів, сонячно-земні зв'язки, космічне приладобудування.

ЄМЕЛЬЯНОВ Леонід Якович — завідувач сектору Інституту іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — радіофізика, динаміка іоносферної плазми, радіотехнічні системи, радары некогерентного розсіяння.

ЗОЛОТУХІНА Анастасія Валеріївна — молодший науковий співробітник відділу астрометрії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — фундаментальна астрометрія, каталоги та астрономічні бази даних, математичні засоби обробки астроінформації.

КАБЛАК Наталія Іванівна — докторант кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — обробка ГНСС-спостережень.

КАЗАНЦЕВА Лілія Вікторівна — науковий співробітник відділу астрометрії і малих тіл Сонячної системи Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, дослідження Місяця, архіви астрономічних даних.

КАШУБА Світлана Григорівна — інженер II категорії Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

Напрямок науки — космічне сміття (спостереження та обробка даних), архіви астрономічних даних.

КОВАЛІНСЬКИЙ Мирослав (KOWALIŃSKI Mirosław) — провідний спеціаліст з електроніки і інженерного програмування відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, магістр наук.

Напрямок науки — електроніка, комп'ютерні науки.

КОЗАК Павло Миколайович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

КРУЧИНЕНКО Віталій Григорович — провідний науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

МАЖАЄВ Олександр Едуардович — інженер-дослідник лабораторії інформаційних технологій Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — астрометрія, астрономічні бази даних, математичні засоби обробки астроінформації.

МИРОШНИЧЕНКО Алла Павлівна — старший науковий співробітник відділу декаметрової радіоастрономії Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — декаметрова радіоастрономія, каталоги галактик.

МПЦЕНКО Олександра Василівна — молодший науковий співробітник відділу системного аналізу й проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — динаміка космічних систем, нелінійні коливання.

ПАЗЮРА Сергій Олександрович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — фізика іоносфери, сонячно-земні зв'язки.

ПАКУЛЯК Людмила Казимирівна — старший науковий співробітник відділу астрометрії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, зоряні каталоги та астрономічні бази даних, математичні засоби обробки астроінформації.

ПИРОЖЕНКО Олександр Володимирович — провідний науковий співробітник відділу системного аналізу й проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — динаміка космічних систем, нелінійні коливання.

ПІХУН Олександр Іванович — молодший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Напрямок науки — змінні зорі, архіви астрономічних даних.

ПЛОЦЕНЯК Стефан (PŁOCIENIAK Stefan) — провідний інженер відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, магістр наук.

Напрямок науки — оптика.

ПОДГУРСЬКИЙ Петро (PODGÓRSKI Piotr) — спеціаліст з електронної інженерії відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, магістр наук.

Напрямок науки — електроніка, детектори, комп'ютерні науки.

ПРОЦЮК Юрій Іванович — зав. лабораторії інформаційних технологій Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, астрономічні бази даних, математичні засоби обробки астроінформації.

РОЖИЛО Олександр Олександрович — провідний інженер Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

СЕРГЄЄВА Тетяна Павлівна — старший науковий співробітник відділу астрометрії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, астрономічне приладобудування, обробка зображень, архіви астрономічних даних.

СИЛЬВЕСТЕР Януш (SYLWESTER Janusz) — Директор відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, професор.

Напрямок науки — фізики Сонця, спектроскопія рентгенівського випромінювання.

СЯРКОВСЬКИЙ Марек (SIARKOWSKI Marek) — головний науковий співробітник відділення фізики Сонця Центру космічних досліджень Польської академії наук, доктор наук.

Напрямок науки — фізика Сонця.

ТАРАНУХА Юрій Григорович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

ХАРИТОНОВА Софія Валеріївна — науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — фізика іоносфери, сонячно-земні зв'язки.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національно-

го університету ім. В. Н. Каразіна, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, лауреат Премій Ради Міністрів СРСР.

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

ШЛЯПНИКОВ Олексій Олексійович — науковий співробітник лабораторії фізики зір та галактик Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія».

Напрямок науки — зоряна астрономія, архіви і бази астрономічних даних.

ШУЛЬГА Олександр Васильович — заступник директора з науки, завідувач лабораторії Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — астрометрія, фізика сонячно-земних зв'язків, навколосемний космічний простір.