НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 20 5(90) + 2014

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

3MICT

Баранец Н., Ружин Ю., Ерохин Н., Афонин В., Войта Я., Шмилауэр Я., Кудела К., Матишин Я., Чобану М. Резонансные эффекты взаимодействия волн и частиц при искусственной инжекции пучков заряженных частиц в ионосферной плазме

Дудкін Д. Ф., Проненко В. О., Корепанов В. Є., Клімов С. І. Випромінювання ліній електропередач у навколоземному просторі

Колобродов В. Г., Лихоліт М. І., Поздняков Д. В., Тягур В. М. Оптичні системи зображувальних фур'єспектрометрів дистанційного зондування Землі

Томченко О. В. Використання космічної інформації Д33 та наземних спостережень для комплексної оцінки екосистемних послуг Київського водосховища на основі методу аналізу ієрархій

Гнатушенко В. В., Кавац О. О., Макаров О. Л., Бражнік Д. П. Дослідження ефективності методів злиття сканерних даних аерокосмічної багатоспектральної зйомки

© НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2014 © ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2014

CONTENTS

- **3** Baranets N., Ruzhin Yu., Erokhin N., Afonin V., Vojta J., Smilauer J., Kudela K., Matisin J., Ciobanu M. Resonance effects of wave-particle interactions during artificial charged particle beam injections in ionospheric plasma
- 27 *Dudkin D. F., Pronenko V. O., Korepanov V. Ye., Klimov S. I.* Power lines radiation in the near-Earth space
- 35 Kolobrodov V. G., Lykholit M. I., Pozdniakov D. V., Tiagur V. M. Optical systems of Fourier transform imaging spectrometer for remote sensing
- **41** *Tomchenko O. V.* Using remote sensing imagery and ground-based observations for integrated assessment of the kyiv reservoir's ecosystem services on the basis of analytic hierarchy process
- **50** *Hnatushenko V. V., Kavats O. O., Makarov O. L., BrazhnikD. P.* An investigation of efficiency of fusion methods of scanner aerospace multispectral images

Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д. Гравічутливість 55 Lobachevska O. V., Khorkavtsiv Ya. D. Gravisensitivity in the в онтогенезі мохів

Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Мороз А. Л., Шаповал И. В., Скрынская Н. Э. Ресурс и надёжность работы тепловых труб с капиллярными структурами волокнистого строения

Кириченко О. В., Клименко В. Н., Гусарова И. А., Шаповал И. В., Шевляков Ю. А. Получение из металлических волокон пористых и композиционных материалов с высокой эффективностью экранирования

НАШІ АВТОРИ

moss ontogenesis

- 61 Kostornov A. G., Shapoval A. A., Moroz A. L., Shapoval I. V., Skrynskaia N. E. Resources and reliability of heat pipes with fiber capillary structure
- 66 Kirichenko O. V., Klimenko V. N., Gusarova I. A., Shapoval I. V., Shevliakov Yu. A. The production and screening efficiency of porous and composition materials from steel fibres

78 OUR AUTHORS

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

Підписано до друку 23.12.14. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 8,40 + 0,42 вкл. Обл.-вид. арк. 9,26. Тираж 100 прим. Зам. № 4102.

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

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

УДК 550.388.2

Н. Баранец¹, Ю. Ружин¹, Н. Ерохин², В. Афонин², Я. Войта³, Я. Шмилауэр³, К. Кудела⁴, Я. Матишин⁴, М. Чобану⁵

¹Інститут земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль Російської академії наук (ІЗМІРАН), Троїцьк, Росія

² Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва,

³ Інститут фізики атмосфери Академії наук Республіки Чехія, Прага, Республіка Чехія

⁴ Інститут експериментальної фізики Академії наук Словаччини, Кошице, Словаччина

⁵ Інститут космічних наук, Бухарест, Румунія

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН И ЧАСТИЦ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Изучаются механизмы взаимодействия заряженных частиц ионосферной плазмы с продольными плазменными и электромагнитными волнами, возбужденными при проведении активного эксперимента в ионосфере с одновременной инжекцией электронного и ионного пучков с борта космического аппарата «Интеркосмос-25» (ИК-25). Результаты изучения пучково-плазменной неустойчивости относительно возбуждения продольных волн при инжекции электронного пучка ранее были представлены в нашей работе [Физ. плазмы. — 2007. — 33, № 11. — С. 995—1013]. Специфической особенностью эксперимента, проведенного на витках 201, 202, была взаимная ориентация инжекций, при которой потоки заряженных частиц были инжектированы в одном направлении вдоль магнитного поля вверх от Земли таким образом, что относительная форма инжекций представляла собой структуру «пучок в пучке». Результаты пучково-плазменного взаимодействия для такой конфигурации были зарегистрированы в двойной спутниковой системе, состоящей из станции ИК-25 и субспутника «Магион-3». Основное внимание уделено изучению механизмов возбуждения электромагнитных волн в различных частотных диапазонах и их взаимодействия с заряженными частицами ионосферной плазмы, приводящее к ускорению/усилению потоков частиц в поле электромагнитных волн. Рассмотрено также возбуждение свистящих атмосфериков (свистов) на первой гармонике электромагнитных волн. Рассмотрено также возбуждение оэффекта Доплера при инжекции электронного пучка в ионосферную плазму.

1. ВВЕДЕНИЕ

Различные аспекты развития пучково-плазменной неустойчивости (ППН) при инжекции электронного пучка сквозь расширенный полый пучок ионов ксенона в активном космическом эксперименте на витке 202 были рассмотрены в работе [2]. Один из наиболее интересных результатов в этой работе связан с поглощением энергии пучка электронов, или возбуждением высокочастотных (ВЧ) волн в условиях электронно-циклотронного резонанса в зависимости от соотношения ларморовского радиуса вращения электронов к поперечной длине волны (по отношению к магнитному полю B_0). Этот эффект находится в соответствии с теорией развития ППН при инжекции спиралевидного электронного пучка в магнитоактивной плазме (потока осцилляторов [5]), результаты которой использовались при получении различных характеристик неустойчивости. Эта особенность механизма ППН подтверждена экспериментально по измерениям электрических ВЧ-полей e_{hf} и дифференциальных потоков энергичных электронов и ионов J_{e_n} , проведенных на субспутнике «Магион-З».

В работе [14] получено несколько важных результатов, связанных с аномальным усилением

[©] Н. БАРАНЕЦ, Ю. РУЖИН, Н. ЕРОХИН, В. АФОНИН, Я. ВОЙТА, Я. ШМИЛАУЭР, К. КУДЕЛА, Я. МАТИШИН, М. ЧОБАНУ, 2014

низкочастотных (НЧ) электромагнитных полей и квазистационарных электрических/магнитных полей зарегистрированных в области частот, удовлетворяющих соотношению 0.8≤|ω_{*w*} − $-\omega_{he}|/\omega_{LH} \leq 1.2$, где $\omega_m, \omega_{he}, \omega_{LH}$ — частота модуляции и лэнгмюровская частота электронного пучка, а также нижнегибридная плазменная частота соответственно. Несмотря на то что не совсем ясен тип волн, возбуждаемых во внешней среде и связанных с модуляцией пучка в камере электронной пушки, можно предположить, что этот результат связан с нелинейным взаимодействием волн пространственного заряда пучка электронов и волн модуляции, приводящий к биениям на разнице частот ω_m, ω_{be} . Резонансное усиление наблюдается, когда частота этих биений приближается к нижнегибридной плазменной частоте ω_{LH} . Еще одним интересным результатом, впервые полученным в этой работе, является удовлетворительная амплитудная корреляция зарегистрированных на станции ИК-25 электромагнитных волн и инкремента развития пучково-анизотропной, или электромагнитной (ЭМН) неустойчивости. В работе [13] проведено более детальное изучение механизма ЭМНнеустойчивости при инжекции пучка в плазму относительно возбуждения свистовых волн в ионосфере, а также сравнительный анализ экспериментальных результатов, связанных как с этой неустойчивостью, так и ППН.

В настоящей работе продолжено изучение возбуждения свистовых волн в высокочастотной области диапазона на первой гармонике электронной циклотронной частоты и их взаимодействия с окружающей плазмой. Циклотронное возбуждение волн в условиях нормального эффекта Доплера, распространяющихся в обратном направлении к точке инжекции пучка, и последующее их резонансное поглощение/рассеяние при взаимодействии с быстрыми заряженными частицами подтверждено по результатам регистрации частиц и полей на субспутнике. Изучение этих резонансных механизмов дает ответы на ряд вопросов, поставленных в работе [18] относительно аномальных электронных потоков, зарегистрированных на субспутнике «Магион-3» при проведении эксперимента АПЭКС на вит-

ках 431, 514. Численное и экспериментальное изучение пучково-плазменного взаимодействия для различных режимов инжекции пучков, как и представление результатов эксперимента получены либо в виде временной зависимости, либо в зависимости от некоторого характерного параметра, выбранного для изучения конкретного механизма взаимодействия. В последнем случае для анализа экспериментальных результатов использовался комплексный метод, когда объектом исследования были не только сами измерения ионосферных параметров в двух точках пространства, но также численные характеристики процессов для разных параметров пучка и плазмы, полученные на основе этих измерений. Широкий набор экспериментальных данных позволил проведение такого анализа для согласования результатов эксперимента и предполагаемого механизма взаимодействия. В настоящей работе основное внимание уделено изучению механизма электромагнитной неустойчивости (ЭМН) относительно раскачки свистовой моды при инжекции электронного пучка в условиях высокоширотной ионосферы. Для изучения резонансных и нерезонансных механизмов взаимодействии типа волна-частица при инжекции пучков в плазму главным объектом исследования были дифференциальные потоки заряженных частиц различных энергий, зарегистрированные на субспутнике «Магион-3».

В эксперименте АПЭКС многие параметры электронной инжекции близки к тем, которые наблюдались в ракетном эксперименте «Polar-5» с отгружаемым приборным отсеком, проведенном по аналогичной схеме «мать-дитя» [15]. За время инжекции электронного пучка с энергией 8—10 кэВ, произведенной с дочернего отсека, усиление низкоэнергичных электронных потоков было зарегистрированно спектрометрами на материнском отсеке на расстоянии 10-15 м вдоль силовых линий магнитного поля. Было сделано предположение, что на больших высотах индуцированные электронным пучком продольные волны могут стимулировать коллективные эффекты взаимодействия волн и частиц, способных вызвать рост электронных потоков тепловой плазмы. Эксперименты с электрическими пучками проводились также на спутниках и космических челноках. Результаты этих исследований опубликованы в многочисленных обзорах и монографиях (например [4, 7]). Один из наиболее важных с практической точки зрения вопросов связан с изучением проблемы обмена большими токами между проводящими поверхностями и окружающей плазмой, а также поведением потенциала корпуса спутника. В нашем спутниковом активном эксперименте, проведенном в высокоширотной ионосфере на высотах 1450—1800 км (витки 201, 202), больших изменений потенциала корпуса спутника ИК-25 не зарегистрировано, возможно из-за того, что электронная инжекция проходила на фоне напуска нейтрального газа ксенона. Можно предположить, что напуск нейтрального газа или инжекция квазинейтральной плазмы способны эффективно нейтрализовать заряд пучка инжектированных частиц [16]. Предполагается также, что инжекция пучка ионов ксенона приводит к возбуждению волн в крайне низкочастотной (КНЧ) области спектра, максимум энергии которого сильно смещен относительно энергетического пика в спектре индуцированных электронной инжекцией волн таким образом, что в линейном приближении нет какой-либо параметрической связи между ними. Поэтому непосредственным влиянием инжекции ионного пучка на индуцированный электронным пучком ВЧ-спектр можно пренебречь.

2. НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИНЖЕКЦИЙ

Ионным инжектором был стационарный плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и продольным ускорением ионов ксенона (УЗДП). Ионный ток изменялся в пределах $I_{bi} \approx$ $\approx 2.0...2.6$ А, а выходная энергия ионов достигала 250 эВ. Для ускорения электронов использовалась прямоканальная 3-электродная пушка (ЭП) с частотой модуляции от 32 Гц до 250 кГц (в течение времени 2—12 с) после 1-й секунды *dc*-инжекции (без модуляции) и 1-с интервалами между элементарными циклами инжекций. Общая длительность одного цикла с перебором частот 23 с, а мощность электронной инжекции в трех последовательных циклах составляла 30, 60, 90 % от номинальной. Управляющий электрод ЭП обеспечивал 100-процентную модуляцию электронного тока $I_{be} \sim 100$ мА и, таким образом, формировал отдельные микроимпульсы длительностью 2 мкс. Пучки заряженных частиц инжектировались на фоне напуска нейтрального газа ксенона; скорость истечения газа 3 мГ/с. Основные характеристики инжекторов и другие параметры пучково-плазменной системы (в экспериментах на витках 201, 202) представлены в таблице.

Для регистрации энергичных заряженных частиц на субспутнике использовался спектрометр ДОК-А, измерявший дифференциальные потоки электронов и ионов (протонов) для восьми энергетических ступеней в диапазоне 25-420 и 20-1300 кэВ соответственно. Для измерения потоков быстрых частиц две пары детекторов 1Е, 1Р и 2Е, 2Р, установленные на субспутнике «Магион-3», были ориентированны по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Детекторы 1Е, 1Р ориентированы вдоль оси z', а детекторы 2E, 2P — в плоскости -x', -y'. Заряженные частицы мягких энергий регистрировались спектрометром МПС/ППС с двумя типами датчиков и общим блоком электроники. Электроны и ионы детектировались в диапазоне от 10 эВ до 20 кэВ с помощью двух тороидальных анализаторов (ППС) с шестью веерообразными секторами в плоскости паралельной оси z' таким образом, что измерения охватывали весь диапазон питчуглов. Потоки электронов по двум направлениям вдоль оси z' измерялись также с помощью цилиндрических электростатических анализаторов (МПС). Весь диапазон измерений делился на 16 энергетических ступеней и мог изменяться по команде. Составляющие магнитного поля на станции и субспутнике были измерены феррозондовыми магнитометрами СГР-5 и СГР-6 с точностью 1 нТл и 2/16 нТл соответственно. Точность измерений магнитометром, установленным на субспутнике, изменялась автоматически в зависимости от реальной величины магнитного поля $|B_0|$. Температура электронов T_e и плотность ионов тепловой плазмы $n_i(V)$ (где

| <u>^</u> | | |
|------------------------|------------------------------|-----------------------|
| A LOHODIH IO HODOMOTO | | AUATANIII D UAUAAMADA |
| Основные папамети | і пучково-плазменной | системы в ионосшере |
| o enconner mapaire i p | 1 119 111020 111140.10111101 | |

| Параметр | Значение | |
|--|--|----------------------------|
| Плотность невозмущенной плазмы | $n_0 \approx n_{ix} (V \leq 1 \mathrm{V})$ | 3000—7000 см ⁻³ |
| Температура электронов невозмущенной плазмы | T_{ex}, T_{ey}, T_{ez} | 50000, 34000, 45000 K |
| Ток инжекции ионов ксенона и электронов | I_{bi}, I_{be} | 2.1–2.4, 0.1 A |
| Максимальное ускоряющее напряжение для ионов/электронов | U_i, U_e | 0.25, 10 кВ |
| Альвеновская и потоковая скорости электронов и ионов ксенона | v_A, u, v_{iz} | 7500, 42000, 11 км/с |
| Средний поперечный размер ионного и электронного пучков | r_{cx}, r_{ce} | 270, 10 м |
| Гирочастота ионов ксенона | ω_{cx} | 14—20 рад/с |
| Ленгмюровская частота ионного пучка | ω_{px} | 13—16 рад/с |
| Гирочастота водородной составляющей плазмы | ω_{ci} | 1900—2500 рад/с |
| Ленгмюровская частота водородной составляющей плазмы | ω_{pi} | 0.13—0.16 Мрад/с |
| Гирочастота электронов | ω _{ce} | 3.4—4.4 Мрад/с |
| Ленгмюровская частота электронов невозмущенной плазмы | ω _{pe} | 5.6—6.5 Мрад/с |
| Ленгмюровская частота электронов пучка в режиме <i>dc</i> -инжекции для модели полого пучка Частота модуляции тока электронов для 2—12 с <i>ac</i> -инжекции | ω_{be} | 0.13—0.14 Мрад/с |
| (после 1 с dс-инжекции) | $\omega_m/2\pi$ | 32—250000 Гц |

0 < V < 12 В — свипирующее напряжение на сетке ионной ловушки) были измерены с помощью комплексов КМ-10 и КМ-13, установленных на станции и субспутнике. Различные ионосферные параметры, такие как квазистационарное электрическое поле E (0.1—2 Гц) и электрическая/магнитная составляющие КНЧ-ОНЧ-волн, используемые в этой работе, измерялись научными приборами размещенными на обоих спутниках. Более детальные характеристики научных приборов, установленных в двойной спутниковой системе, приведены в работе [9].

Пространственные составляющие поля, измеренные в прямоугольных системах координат *X*, *Y*, *Z* и *x*', *y*', *z*' на спутнике и субспутнике, преобразованы в новые для левополяризованной прямоугольной координатной системы *x*, *y*, *z* с осью $z || B_0$. Углы β_3 , β'_3 между полем B_0 и осями *Z* и *z*' для спутника/субспутника были определены с помощью магнитометров СГР-5 и СГР-6 соответственно. Расстояние между спутниками ИК-25 и «Магион-3» изменялось в пределах 110—120 км для рассматриваемых витков с активным режимом работы научной аппаратуры. К сожалению, точные данные о положении субспутника на орбите не могут быть представлены в этой работе, но известно, что орбита субспутника эллиптически сильно вытянута вдоль орбиты основного спутника. Станция ИК-25 гиростабилизирована по трем осям в пространстве в то время, как субспутник «Магион-3» гиростабилизирован по одной оси z', но с достаточно большим периодом прецессии около 8-9 мин. Весь активный цикл работы научной аппаратуры не превышал 10-12 мин, это время ограничивалось не только энергетической емкостью источника питания на ИК-25, но и объемом памяти на «Магион-3» с его относительно высокоскоростной телеметрией. С учетом последнего обстоятельства научная аппаратура на субспутнике включалась незадолго до начала активного цикла инжекций. Данные телеметрии, полученные во время сбоев в работе научной аппаратуры были помечены битом «фальш», который был общим для всего телеметрического кадра, но не всегда истинным для отдельных приборов, или измеряемых параметров. Для исключения неоднозначности все экспериментальные данные, представленные ниже, соответствуют биту «истина».

3. ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Конфигурация инжекции электронного пучка сквозь пучок ионов ксенона является аксиально-несимметричной относительно направления магнитного поля из-за малости составляющей скорости ионов пучка ($v_{iz} / u \sim 3.10^{-4}$), которая сравнима со скоростью спутника ($v_{iz} / v_s \sim 1.5$), движущегося под некоторым углом к магнитному полю (рис. 1). В присутствии земного маг-

нитного поля, коллимирующего потоки инжектированных частиц (ионов, электронов) вдоль силовых линий, определяющим фактором взаимной конфигурации пучков является соотношение питч-углов инжекций относительно предельного значения 90°. В том случае, когда оба питч-угла α_p для ионов и электронов превышают 90° или меньше 90°, конфигурацию инжекций можно считать сквозной в зависимости от ориентации вектора спутника по отношению к силовым линиям B_0 . Например, в случае прове-



Рис. 1. Инжекция электронного пучка (e^-) сквозь полый пучок ионов ксенона Xe⁺ с плотностью и скоростью пучков n_{be} , v и n_{bi} , v_i соответственно. Напуск электронов с плотностью и потоковой скоростью n_e , u_e для компенсации заряда ионного пучка на выходе УЗДП показан широкой стрелкой вверх. Векторы **B**₀ и **v**_s показывают направление квазипостоянного магнитного поля и скорости спутника в системе координат X, Y, Z, ось Z направлена от Земли. A — область генерации свистовых мод ω , **k** пучком электронов под улом θ к магнитному полю. «1e», «1p», «2e», «2p» — две пары датчиков для регистрации энергичных частиц прибором ДОК-А, SEA — шестисекторный датчик мягких электронов спектрометра МПС/ППС, α_{o1} — питч-угол регистрации для 1-го сектора в системе координат x', y', z'

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

дения активного эксперимента в экваториальных широтах (где $v_{s} \| B_{0}$) конфигурация инжекций была бы почти соосной и это был бы наиболее интересный и многообещающий случай, от которого можно было бы ожидать самых неожиданных результатов в зависимости от строгости коллинеарности. Все другие случаи взаимных направлений вызовут разнонаправленные потоки инжекций. В общем случае инжекции пучка в пучок при определенных параметрах инжекции генерируемые ВЧ-осцилляции могут достигнуть уровня насыщения (соответствующему началу нелинейного режима), начиная с которого спектр расширяется в сторону низких частот. Несмотря на достаточно критичные условия, при которых эстафетная перекачка энергии ВЧ-волн может достигнуть длинных масштабов (ВЧ \rightarrow (контролируемого) стока волновой энергии не запрещен с точки зрения его реализации. Можно утверждать, что генерация волн ультранизких частот (УНЧ), а также контроль механизма нелинейного взаимодействия электронного пучка с ионосферной плазмой и трансформация энергии в длинные масштабы являются предметом научного интереса. При этом сами плазменные неустойчивости (ППН, ЭМН, модуляционная), неизбежно возникающие при неидеальной (косой) конфигурации инжекций, играют роль паразитных, разрушающих структуру пучка.

При косой инжекции полый пучок тяжелых ионов ксенона, инжектированный с разбросом питч-углов $\Delta \alpha_{ni} \approx 60^{\circ}$ (максимумом плотности в пределах $\Delta \alpha_{ni} \leq 30^\circ$), играет роль дополнительного поглощающего слоя с переменными параметрами для индуцированных электронным пучком волн вдоль всей области взаимодействия, однако этот вопрос находится в стороне от основной задачи настоящей работы. И в этом смысле мы имеем право утверждать, что оно проводится последовательно, по возможности абстрагируясь от ряда комплексных факторов. Это в значительной мере касается и самих экспериментальных данных. Сама идеология проведения активного эксперимента в космической плазме в течение весьма короткого промежутка времени требует отношения к нему, как к обычному лабораторному эксперименту. И чем спокойнее магнитосфера, тем более достоверны полученные результаты. Хотя это самое общее требование, но в нашем случае оно имеет определяющее значение.

3.1. Токовая структура пучка. При инжекции низкоэнергичного электронного пучка (~10 кэВ) в ионосферную плазму развитие плазменных неустойчивостей и возбуждение электромагнитных полей существенно зависит от формы и плотности пучка. С другой стороны, для сложных токовых систем профиль инжектированного пучка существенно зависит также от плотности энергии возбуждаемых волн, которые в свою очередь модулируют электронный пучок. Для определения основных характеристик в процессе возбуждения волн предполагается, что электроны инжектированы (в точке $z \approx 0$) при наличии электрического поля поляризации, существующего в течение времени инжекции 1 с и модулирующего заряд пучка в ближней области инжекции. После нескольких гировращений плотного пучка частиц силы электростатического отталкивания преобразуют его в полый поток со средней плотностью n_{ha} (a = e, i), определяемой выражением

$$I_{ba} \cong 2\pi \int_{h}^{r_2} ev_z(r) n_{ba}(r) r dr,$$

где r_1 и r_2 — минимальный и максимальный радиус вращения заряженной частицы на внутренней и внешней границах полого пучка, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Средняя потоковая скорость определена как

$$u \equiv \langle v_z \rangle_{\alpha} = (1 / \Delta \alpha') \int_{\Delta \alpha'} v \cos(\alpha_p + \alpha) d\alpha,$$

где эффективный питч-угловой раствор $\Delta \alpha' > \Delta \alpha_0$ (примерно 2—3° и 60° для электронов и ионов соответственно при z = 0). Эффективный раствор питч-углов для электронов

$$\Delta \alpha' \approx \Delta \alpha_0 + + \frac{\pi e}{m v \omega_{ce}} (\delta \overline{E}_x + v \delta \overline{B}_z \sin \alpha_{pe} - v \delta \overline{B}_y \cos \alpha_{pe}) \quad (1)$$

отражает амплитудную модуляцию пучка квазипостоянными полями в области инжекции за время $t \approx 1$ с, где e,m — заряд и масса элект-

рона, а ω_{ce} — электронная гирочастота. Черта вверху ($\delta \overline{M}_{x,y,z} = \overline{M}_{x,y,z} - \overline{M}_{x,y,z}$) обозначает эмпирическое среднее за интервал времени $\Delta t \approx$ ≈ $(7...10)\Delta t_0$ для какого-либо измерения *M*, где Δt_0 — продолжительность телеметрического кадра для ИК-25 и v — скорость электрона при z = 0 (на выходе модулятора ЭП). Сглаживание физических величин в полуэмпирической формуле (1) имеет важное значение для исключения влияния быстрых флюктуаций при расчете плотности инжектированного пучка; без такой сглаживающей процедуры возрастает вероятность появления численной неустойчивости. Оценка амплитуды флюктуаций поперечных и продольных составляющих скорости инжектированных частиц в равновесном случае определялись как $\delta v_{\perp,z} \leq \max\{v_{\perp,z} - \langle v_{\perp,z} \rangle_{\alpha}\},\ a$ тепловая скорость электронов потока — как $v_{be} \sim (\delta v_z^2 + \delta v_{\perp}^2)^{1/2}$, здесь $v_{\perp} \equiv (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$. Это дало возможность использовать эффективную угловую расходимость $\Delta \psi \equiv$ $\equiv \cos^{3}(\alpha_{pe} - \Delta \alpha' / 2) - \cos^{3}(\alpha_{pe} + \Delta \alpha' / 2) \quad \text{kak mepy}$ нагрева пучка.

3.2. Модуляция электронного тока пучка. Неоднородный электронный пучок в камере ЭП производится в две стадии. На протяжении короткого времени взаимодействия с управляющим полем модулятора $\tau_i \omega_m \ll 1$ ($\tau_i = 2$ мкс) низкоэнергичный электронный пучок вначале модулируется по скорости, затем пучок дополнительно ускоряется в пространстве между анодом и сеточным модулятором. Наиболе важными параметрами взаимодействия электронов с полем в модуляторе ЭП являются глубина модуляции р, изменение фазы поля Θ_1 , или эффективность воздействия управляющего поля на пучок электронов $G = 2\sin(\Theta_1/2)/\Theta_1$ [10]. В режиме модуляции пучка в камере ЭП (в простейшем случае свободного гировращения электронов во внешнем пространстве) спектральный состав тока электронов I_{be} определяется выражением

$$I_{be}(z,t) = I_0 + 2I_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(nX_D(z)) \times \\ \times \cos n[\omega_m t - \Theta_D(z) - \Theta_1/2], \qquad (2)$$

где $J_n(nX_D(z))$ — функция Бесселя, а $X_D(z) = -\rho G\Theta_D(z)/2$ — параметр бунчировки тока пучка

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

на длине z. Ток I₀ определен для первой секунды *dc*-инжекции. Амплитуды гармоник конвекционного тока пучка определяются выражением $I_{he}^{n}(z,t) = 2I_{0}J_{n}(nX_{D}(z))$. В режиме модуляции ленгмюровская частота электронного пучка ω_{be} определена для первой гармоники I¹_{he} конвекционного тока. Однако динамика электронов пучка в ионосферной плазме сильно зависит от возбуждаемых в результате электромагнитной неустойчивости поперечных волн и собственных полей, связанных с плотностью заряда и тока пучка [11]. Индуцированные пучком волны, распространяясь назад к точке инжекции, приводят к модуляции скорости электронов вдоль тела пучка, образуя обратную связь в пучково-плазменной системе. Несмотря на то что возмущение скорости электронов пучка, определенное с помощью соотношения (1), используется только для оценки эффективной питч-угловой расходимости пучка, вопросы самосогласованного взаимодействия пучка и полей в плазме остаются вне области нашего внимания. Ток $I_{be}(z,t)$ в режиме модуляции определяется для первой гармоники конвекционного тока. Вопрос компенсации заряда пучка ионами окружающей плазмы является достаточно сложной проблемой и не расматривается здесь.

3.3. Электромагнитная неустойчивость. Электронный пучок, движущийся сквозь ионосферную плазму вдоль силовых линий магнитного поля, может возбуждать электромагнитные волны в диапазоне частот $\omega_{ci} << \omega << \omega_{ce}$ для случая относительно слабого магнитного поля. Известно, что в гидродинамическом приближении поперечные волны с $k_{\perp} = 0$ не возбуждаются холодным пучком с потоковой скоростью и. Однако электромагнитная, или пучково-анизотропная неустойчивость очень чувствительна к анизотропии функции распределения пучка. В этом случае неустойчивость может возрастать даже при условии cos θ≈1. Составляющие тензора диэлектрической проницаемости плазмы при наличии электронов пучка содержат маленькую поправку $\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{ii}^{0} + \varepsilon_{ii}^{'}$, где ε_{ii}^{0} и ε_{ii}' — составляющие тензора диэлектрической проницаемости для холодной плазмы и частиц пучка соответственно. При отсутствии пучка электронов соответствующая форма общей диэлектрической проницаемости плазмы относительно возбуждения свистовых войн ($\omega^2 \ll \omega_{pe}^2$, $\theta \neq 0$) может быть представлена в форме [6]

$$N^2 \cos^2 \theta \approx \varepsilon_{11}^0 \mp i \varepsilon_{12}^0, \qquad (3)$$

где $N^2 = c^2 k^2 / \omega^2$, а составляющими тензора диэлектрической проницаемости плазмы являются величины

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^{0} &= -\omega_{pe}^{2} / (\omega^{2} - \omega_{ce}^{2}) ,\\ \varepsilon_{12}^{0} &= -i\omega_{pe}^{2} \omega_{ce} / [\omega(\omega^{2} - \omega_{ce}^{2})] . \end{aligned}$$

Для достаточно плотной плазмы ($\omega_{pe}^2 >> \omega_{ce}^2$) и квазипродольного распространения волн решение уравнения (3) относительно возбуждения волн свистового диапазона может быть представлено выражением

$$\omega(k,\theta) = \frac{|\omega_{ce}| c^2 k^2 \cos\theta}{\omega_{pe}^2 + c^2 k^2}.$$
 (4)

Соответствующее уравнение для возбуждения свистовых волн в пучково-плазменной системе может быть представлено в виде

$$N^2 \cos\theta \pm i\varepsilon_{12}^0 - \varepsilon_{\pm}' / \cos\theta = 0, \qquad (5)$$

где $\varepsilon_{\pm}' = (\varepsilon_{11}' \mp 2i \cos \theta \varepsilon_{12}' + \cos^2 \theta \varepsilon_{22}')/2$ являются поправками составляющих тензора диэлектрической проницаемости из-за наличия электронов пучка. Составляющими тензора, обусловленными разогретым пучком, в кинетическом приближении являются

$$\varepsilon_{11}' = \frac{4\pi e^2}{m\omega} \left\langle \sum_{n=-\infty}^{\infty} \zeta_n \Phi_{\perp} v_{\perp}^2 \frac{n^2}{\xi^2} J_n^2(\xi) \right\rangle,$$

$$\varepsilon_{12}' = \frac{4\pi e^2}{m\omega} \left\langle \sum_{n=-\infty}^{\infty} \zeta_n \Phi_{\perp} i v_{\perp}^2 \frac{n J_n J_n'}{\xi} \right\rangle, \qquad (6)$$

$$\varepsilon_{22}' = \frac{4\pi e^2}{m\omega} \left\langle \sum_{n=-\infty}^{\infty} \zeta_n \Phi_{\perp} v_{\perp}^2 J_n'^2(\xi) \right\rangle,$$

где $\zeta_n = (\omega - n\omega_{ce} - k_z v_z)^{-1}$, $\xi = k_\perp v_\perp / \omega_{ce}$ и $\langle ... \rangle = = \int (...) v_\perp dv_\perp dv_z$. Здесь k_z — продольная составляющая волнового вектора для волн, распространяющихся под углом θ к магнитному полю в прямоугольной системе координат *x*, *y*, *z*, и

$$\Phi_{\perp} = \frac{1}{\nu_{\perp}} \frac{\partial F'}{\partial \nu_{\perp}} + \frac{k_z}{\omega} \left(\frac{\partial F'}{\partial \nu_z} - \frac{\nu_z}{\nu_{\perp}} \frac{\partial F'}{\partial \nu_{\perp}} \right).$$
(7)

Функция распределения электронов пучка определена в виде

$$F' = n_{be}^0 \delta(v_z - u) f_{\perp}(\varepsilon_{\perp}) \left(\varepsilon_{\perp} = v_{\perp}^2 / 2\right)$$

таким образом, что

$$\overline{v_{\perp}^{2}} / 2 \equiv \int \varepsilon_{\perp} f_{\perp}(\varepsilon_{\perp}) d\varepsilon_{\perp} \neq 0,$$

$$I_{A} = \int \varepsilon_{\perp} f_{\perp}'(\varepsilon_{\perp}) d\varepsilon_{\perp} \neq -1,$$
(8)

где n_{be}^0 — равновесное значение плотности пучка электронов, $f_{\perp}(v_x^2 + v_y^2)$ — двумерная функция распределения пучка соответственно. Используя составляющие ε'_{ij} , определенные в уравнении (6), выражение для ε'_{\pm} может быть представлено в форме

$$\varepsilon_{\pm}' = \frac{4\pi e^2}{m\omega} \left\langle \sum_{n=-\infty}^{\infty} \zeta_n \Phi_{\perp} [(n/\xi) J_n(\xi) \pm \cos\theta J_n'(\xi)]^2 \cdot \frac{v_{\perp}^2}{2} \right\rangle.$$
(9)

Путем суммирования по n = -1, 0, +1 и интегрирования в пространстве фазовых скоростей $\langle ... \rangle$ это уравнение для $\theta \neq 0$ может быть сведено к следующему:

$$\varepsilon_{\pm}' = -\frac{\omega_{be}^2}{4\omega^2} \left[\frac{I_A(\omega - k_z u)(1 \pm \cos\theta)^2}{\omega - \omega_{ce} - k_z u} + \frac{k_z^2 (\overline{v_{\perp}^2}/2)(1 \pm \cos\theta)^2}{(\omega - \omega_{ce} - k_z u)^2} + \frac{I_A(\omega - k_z u)(1 \mp \cos\theta)^2}{\omega + \omega_{ce} - k_z u} + \frac{k_z^2 (\overline{v_{\perp}^2}/2)(1 \mp \cos\theta)^2}{(\omega + \omega_{ce} - k_z u)^2} \right], \quad (10)$$

которое для случая $\theta = 0$ переходит в ε'_{+} , описанное в работе [6], здесь $\omega_{be}^2 = 4\pi e^2 n_{be}^o / m$. Третий и четвертый член с правой стороны уравнения (10) можно не учитывать, если первые два являются резонансными, и наоборот для случая очень энергичных пучков. Как результат дисперсионное уравнение для возбуждения свистовой моды может быть представлено в форме ($|\varepsilon_{11}^0| < |\varepsilon_{12}^0|$):

$$\frac{c^{2}k^{2}\cos\theta}{\omega^{2}} + \frac{\omega_{pe}^{2}\omega_{ce}}{\omega(\omega^{2} - \omega_{ce}^{2})} \approx \\ \approx -\frac{\omega_{be}^{2}\chi_{\pm}}{4\omega^{2}} \left[\frac{I_{A}(\omega - k_{z}u)}{\omega - \omega_{ce} - k_{z}u} + \frac{k_{z}^{2}(\overline{v_{\perp}^{2}}/2)}{(\omega - \omega_{ce} - k_{z}u)^{2}} \right], (11)$$

где $\chi_{\pm} = (1 \pm \cos \theta)^2$. Из уравнения (11) следует, что возбуждение электромагнитных волн про-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

исходит в диапазоне частот $\omega - \omega_{ce} - k_z u \approx 0$ для случая ε'_{+} (нормальный эффект Доплера, n=1), или при $k_z \approx -\omega_{ce} / u$. Из этого следует также, что в этих условиях благодаря развитию электромагнитной неустойчивости возбуждаются назад распространяющиеся волны свистового диапазона. Этот случай представляет особый интерес, так как экспериментальная диагностика на «Магион-3» и его ориентация в пространстве (см. рис. 1) способствует изучению этой неустойчивости. В приближении пучков с малой плотностью $n_{be} \ll n_0$ и абсолютным характером развития неустойчивости, решение уравнения (11) может быть получено для частот $\omega \approx k_{u} + n |\omega_{ce}| + \varepsilon$, где частота ω соответствует решению дисперсионного уравнения относительно возбуждения свистовых волн в ионосферной плазме, и $\varepsilon = \delta \omega + i \gamma$ $(|\varepsilon| \ll |\omega|, n = 0, \pm 1)$. Для умеренных расстроек, когда $|\varepsilon/(\omega-k_z u)| << 1$, или $|\varepsilon(\omega-k_z u)| << |(\omega-k_z u)|$ $-k_z u)^2 - \omega_{ce}^2$, линеаризуя уравнение (11) по малому параметру $|\eta| = |\epsilon / \omega| << 1$ и пренебрегая членами порядка η^3, η^4 , дисперсионное уравнение может быть сведено к форме $A\eta^2 + B\eta + C = 0$, где величины А, В, С представляют собой очень громоздкие функции параметров $\omega_{\mu\nu}, \omega_{ce}, \omega, \omega_{be}, u$, *v*₁. В этом случае нормированная скорость роста $\gamma / \omega \equiv Im\eta$ возбуждаемых волн равна величине

$$Im\eta = \frac{+\sqrt{|B^2 - 4AC|}}{2A}, B^2 \le 4AC.$$
 (12)

Несмотря на то, что дисперсионное уравнение (11) было получено в кинетическом приближении, решение этого уравнения относительно скорости роста волн имеет квазигидродинамический характер $\gamma \equiv \gamma^h$ в том смысле, что основная группа электронов пучка ответственна за развитие неустойчивости.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При инжекции электронного пучка сквозь пучок ионов ксенона наблюдаются возмущения составляющих квазипостоянного магнитного поля как вблизи точки инжекции на станции ИК-25, так и в отдаленной области плазмы на субспутнике «Магион-3». На рис. 2 и 3 для витков 201 и 202 соответственно представлены возмущения квазипостоянного магнитного поля, зарегистрированные феррозондовыми магнитометрами в двух точках ионосферной плазмы. Амплитуда зарегистрированных на субспутнике возмущений магнитного поля $\delta B_{x',y',z'} = B_{x',y',z'} - \overline{B}_{x',y',z'}$ в рассматриваемых экспериментах достигала 1000 нТл и выше, в то время как возмущения магнитного поля в точке инжекции на станции зарегистрированы намного менее интенсивными и достигают 20—30 нТл по амплитуде (рис. 3). На этом рисунке представлены возмущения по одной поперечной составляющей магнитного поля $\delta B_{\nu}, \delta B_{\nu'}$, зарегистрированные на станции и субспутнике. Результаты возмущений магнитного поля пучком электронов ранее представлены в работе [9] для случая, когда электронный и ионный потоки были инжектированы в противоположных направлениях вдоль магнитных силовых линий, а их величины достигали значений порядка 500 нТл в ближней области инжекции (виток 266), что на два порядка выше по амплитуде от номинального значения $\delta B \sim I_{be} / r_{ce} \approx$ ≈ 10...20 нТл. Аномально большие значения были зарегистрированы для случая, когда потоковая скорость электронов была близка к альвеновской скорости $u \sim v_4$. Поэтому возбуждение УНЧ-составляющих магнитного поля в диапазоне частот $\omega \le \omega_{ci}$, наблюдаемое на витке 266, было связано с альвеновским резонансом. Экспериментально подтверждено, что возбуждение волн сильно зависит от теплового нагрева пучка, $v_{be} \sim (\delta v_z^2 + \delta v_\perp^2)^{1/2}$. Чем холоднее электроны пучка, тем выше уровень возбуждения КНЧ-ОНЧ-волн при неустойчивости. Этот экспериментальный результат хорошо согласуется с кинетической теорией пучково-плазменного взаимодействия. Большие значения возмущений магнитного поля, наблюдаемые на субспутнике достойны отдельного исследования, а в условиях инжекции двух пучков по 1 кВт мощности механизм генерации не кажется очевидным и простым. Возмущения магнитного поля в дальней области инжекции могут быть представлены, как суперпозиция огибающей пакета альвеновских волн (сигнал) и медленно изменяющихся полей, индуцированных нелинейными токами в плазме [8, 17]. Все представленные даные на рис. 2, 3 доказывают наличие значитель-



Puc. 2. Вариации возмущений составляющих поперечного и продольного квазипостоянного магнитного поля $\delta B_{x;z'}$ (0.1–2 Гц), измеренные на субспутнике «Магион-3», дифференциальные потоки ионов J_{1p} и электронов J_{2e} (спектрометр ДОК-А) с энергией $\varepsilon_{1p} = 40$ кэВ и $\varepsilon_{2e} = 180$ кэВ для направления «1» и «2» соответственно; плотность ионных потоков тепловой плазмы $j_{x'}$, измеренных в направлении -x' на субспутнике, а также магнитная составляющая $\mathbf{b}_{j'}$ ОНЧ-волн (9.6 кГц) представлены в зависимости от времени в активном эксперименте на витке 201. Активный режим работы электронной пушки (ток I_{be}), инжекция ионного пучка (ток I_{bi}) и напуск нейтрального газа ксенона (Xe) в телеметрических вольтах представлены в нижней части рисунка. Отсчет времени *t* произведен относительно момента времени 1 ч 26 мин 59 с (UT) перед началом инжекций (высота орбиты H = 1450...1715 км), расстояние между спутником и субспутником $d \approx 110$ км, $\beta_3 \equiv \beta_3$ (\mathbf{B}_0 , \mathbf{Z}) $\approx 140...155^\circ$, $\beta_3' \equiv \beta_3$ (\mathbf{B}_0 , \mathbf{z}') $\approx 140...165^\circ$, параметр МакИлвайна — L = 1.39...1.51

ных возмущений составляющих магнитного поля, индуцированных после электронной инжекции и зарегистрированных на «Магион-3», а также более слабые возмущения вблизи ИК-25, стимулированные инжекцией ионов ксенона. Эти возмущения достаточно хорошо скоррелированы с циклами инжекции ионов, представленными в нижней части этих рисунков и ранее более детально изучены в работе [3]. Отсутствие данных на рис. 3 вызваны техническими проблемами при передаче телеметрических данных со субспутника.



Рис. 3. Поперечные вариации составляющих квазипостоянного магнитного поля δB_y , и δB_y , измеренных на спутниках «Магион-3» и ИК-25 соответственно; дифференциальные потоки электронов $J_e(1 - \varepsilon_{1e} = 1.99 \text{ куВ}, 2 - \varepsilon_{1e} = 2.8 \text{ куВ})$ и протонов мягких энергий $J_p(3 - \varepsilon_{1p} = 7 \text{ уВ}, 4 - \varepsilon_{1p} = 24 \text{ уВ}, прибор МПС/ППС),$ потоки электронов с энергией $\varepsilon_{2e} = 180 \text{ куВ}$ (спектрометр ДОК-А), измеренные на субспутнике, плотность ионных потоков тепловой плазмы j_{ix} , а также активный цикл работы инжекторов представлены в зависимости от времени для витка 202. Отсчет времени *t* произведен относительно момента 3 ч 24 мин 22 с (UT) (до начала инжекций), высота орбиты H = 1490...1798 км, расстояние между спутниками $d \approx 120 \text{ км}, \beta_3 \approx 140...165^\circ, \beta_3' \approx 135...170^\circ, L = 1.32...1.46$

В верхней части рис. 2 представлены также дифференциальные потоки быстрых ионов и электронов, зарегистрированные для направлений «1р», «2е» на субспутнике. Поведение этих потоков довольно характерно, но из этого не стоит делать каких-либо умозаключений, отметим только максимальную мощность инжекции электронного пучка для третьего 23-с цикла (90%). На этом же рисунке ниже представлены медленные амплитудные вариации ОНЧ-составляющие магнитного поля b_{ij} ($\omega/2\pi = 9.6 \ \kappa \Gamma \mu$) в точке инжекции и ионные потоки тепловой плазмы $j_{ix'}$, зарегистрированные ионной ловушкой в направлении -x' на «Магион-3». В работе [13] для этого случая приведены также данные потенциала корпуса спутника P_s в точ-

ке инжекции, изменения которого происходят синхронно с амплитудой вариаций *b*_{*H*} для 9.6 кГц и вариациями тока инжекции ионов ксенона *I*_{*hi*}. Плотность ионных потоков тепловой плазмы $j_{ix'}$ также имеет характер 10-с вариаций, однако с некоторым запаздыванием, что вполне естественно, если связывать их с инжекцией ионов ксенона и учитывая обратное значение инкремента возбуждения электромагнитных КНЧ-ОНЧ волн ($\gamma_{IIIF} < \omega_{IIIF}$). Природа вариаций $j_{ix'}$ на «Магион-3» может быть связана в конечном счете с параметрами тока ионов в камере УЗДП, как в рассматриваемом случае dc-инжекции ионов (без частотной модуляции), так и с электронной инжекцией, поскольку она также присутствует.

Совсем другое поведение ионных потоков тепловой плазмы обнаружено на орбите 202 (рис. 3) — резонансный характер изменений ионных потоков наблюдается, когда частота модуляции тока электронного пучка приближается к $\omega_m / 2\pi = 62.5$ кГц. Эта частота модуляции близка к диапазону частот $\omega_{ce} / 2\pi / 6 \approx 80...$ 100 кГц, используемому в наших расчетах для определения различных характеристик возбуждаемых электромагнитных волн в области свистящих атмосфериков. Резонансный (аномальный) характер проявляется также для дифференциальных потоков электронов и ионов $J_{e,p}$ (кривые в виде гистограм 1-4, спектрометр МПС/ ППС) и энергичных электронов J_{2e} (ДОК-А), наблюдаемых на субспутнике. Легко заметить повторяемость резонансных явлений при модулированной инжекции электронного пучка, однако более конкретные выводы можно сделать после проведения дополнительного анализа этих явлений.

Кратко сформулируем основные результаты, полученные в активном эксперименте на витках 201, 202 при инжекции пучка электронов сквозь ионный (рис. 2, 3).

• Это прежде всего почти синхронные вариации с периодом 8—10 с ионных потоков тепловой плазмы, потенциала корпуса и амплитуды магнитной составляющей ОНЧ-волн (9.6 кГц) на станции ИК-25, связанные с инжекцией ионов ксенона. • Характерное уменьшение амплитуды возмущений потоков энергичных электронов J_{2e} и ионных тепловых потоков $j_{ix'}$, наблюдаемое на субспутнике, обратно коррелирует с мощностью электронной инжекции для 23-с циклов (30, 60, 90 %). На рис. 2 представлены последние два цикла. Возможно, это происходит на фоне медленных естественных ионосферных изменений, но более вероятно, что подобная регулярность связана с ростом нелинейного воздействия ВЧволн и подавлением низкочастотной составляющей при инжекции пучка в пучок.

• Возмущения потоков ионов J_{1p} (40 кэВ) демонстрируют зависимость от частоты модуляции электронного пучка, так же как и возмущения составляющих квазистационарного магнитного поля.

• При некоторых параметрах пучка и плазмы (виток 202) наблюдаются ярко выраженные резонансные эффекты.

Что касается потоков быстрых частиц, зарегистрированных четырьма спектроанализаторами на «Магион-3», то косвенное подтверждение высыпания электронов с энергиями, на порядок большими по величине, чем энергия инжектированных электронов, ранее было получено в ракетном эксперименте «Аракс» (0.5 A, 27 кэВ). Позже вспышки рентгеновских лучей, наблюдаемые в эксперименте «Триггер», были также связаны с высыпанием быстрых частиц [4, 19]. Необходимо подчеркнуть, что все эти эксперименты, включая вышеописанные на спутниках ИК-25 и «Магион-3» были проведены в различных ионосферных условиях. Поэтому их результаты можно сравнивать только в самом первом приближении.

Очевидно, что представленные возмущения однозначно связаны с инжекцией электронного/ионного пучков, но для получения более детальных характеристик пучково-плазменного взаимодействия в отдаленной области ионосферной плазмы необходимо провести дополнительный анализ. Для этого на второй стадии обработки комплексных данных был использован специальный вычислительный алгоритм. Измеренные данные и численные характеристики процессов на активной стадии эксперимента с включенным электронным ускорителем, h_i и s_i соответственно, были преобразованы (с элементами моделирования активного эксперимента в космосе) в новую цифровую последовательность, $h_i(t), s_i(t), p(t) \Rightarrow h_i(p), s_i(p)$, в порядке возрастания параметра р. Как результат более комплексной обработки данных эксперимента, все последующие рисунки демонстрируют новые зависимости в виде функций некоторого численного параметра р. Для проведения такого анализа необходимо выполнение ряда условий, обязательными из которых были спокойные ионосферные условия в рассматриваемый период времени. Поскольку передача телеметрии со спутника и субспутника производилась независимо и с различной скоростью, то для того чтобы сформировать единый поток цифровых данных с обоих спутников, телеметрические данные были предварительно синхронизованы. Различные аспекты этой методики и алгоритмы решения для поставленных задач подробно описаны в предыдущих работах, например в [1].

Именно в такой форме представлены все последующие данные. Вверху на рис. 4, 5 представлены расчетные значения скорости роста γ^{h}, γ^{k} электромагнитной (свистовой моды) и потенциальных волн пучка в зависимости от частотного соотношения триплета волн $p \equiv p_1 = |\omega_m - \omega_m|$ $-\omega_{be}|/\omega_{LH}$, где ω_{LH} — резонансная нижнегибридная частота. Возбуждение свистовых волн происходит для ионосферных условий, рассмотренных в п. 3.3, когда распространяющиеся в обратном направлении волны (отрицательные значения k) возбуждаются благодаря нормальному эффекту Доплера и направлены к источнику инжекции. Для получения нормированной скорости роста, представленной на этих фигурах, уравнение (12) решено для маленьких расстроек частоты посредством 500×500-итераций по параметрам ω и k около их резонансных значений на каждом временном шаге. Для сравнения скорости роста электромагнитной и пучково-плазменной неустойчивостей, было рассмотрено возбуждение продольных волн на основе кинетического приближения [5]. Для системы «холодная плазма — разогретый пучок» скорость роста этих волн вблизи частот $\omega = \omega_+ + \epsilon$ может

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

быть представлена выражением

$$\gamma^{k} = -\frac{\sqrt{\pi\omega_{be}^{2}\omega_{\pm}}}{2k^{2}v_{be}^{2}} \frac{x_{be}^{[n]}}{2^{[n]}|n|!} \times \left[\frac{\omega_{pe}^{2}}{\omega_{\pm}^{2}}\cos^{2}\theta + \frac{\omega_{pe}^{2}\omega_{\pm}^{2}\sin^{2}\theta}{(\omega_{\pm}^{2} - \omega_{ce}^{2})^{2}}\right]^{-1} z_{0}\exp(-z_{n}^{2}), \quad (13)$$

где

$$z_{n} = \frac{\omega_{\pm} - n |\omega_{ce}| - k_{z} u}{\sqrt{2}k_{z}v_{be}}, \ x_{be} = (k_{x}v_{be} / \omega_{ce})^{2} \text{ if } \omega_{\pm}(\theta)$$

соответствуют верхнему (+) и нижнему (-) плазменному резонансам.

Было возможным также определение квазигидродинамической скорости роста свистовых волн γ^h посредством численных итераций в некотором диапазоне частотных расстроек δω, когда $B^2 \leq 4AC$. Поэтому вычисление инкремента неустойчивости было проведено двумя способами: 1 — для случая, как только расстройка $\delta\omega(\delta k)$ соответствует условию уравнения (12) (представлен на рис. 4), и 2 — для некоторой постоянной частотной расстройки $\delta \omega \equiv \delta \omega_0$ (рис. 5) при выполнении условия (12). Как следствие, решение (12) для $\gamma^{h} \equiv Im\eta$, а также вычисление γ^k первым способом очень чувствительно к малым изменениям ионосферных параметров, данные которых в «режиме реального времени» поступают на вход алгоритма для вычисления параметров неустойчивости.

На рис. 4, 5 представлены данные экспериментов 201, 202 в зависимости от отношения $|\omega_m - \omega_{be}| / \omega_{LH}$. Эти данные являются дополнением до результатов, расмотренных ранее в работе [14]. В диапазоне частот, соответствующих значениям параметра $p_1 \approx 0.8...1.2$, все представленные данные магнитной и электрической ОНЧ-составляющих b_{tr}, e_{tr} для частот $\omega / 2\pi = 9.6$ кГц и 149, 75 Гц соответственно, заметно усилены по амплитуде (рис. 4). Эти ОНЧволны зарегистрированы в точке инжекции, в то время как дифференциальные потоки электронов J_{1e} с энергией $\varepsilon_{1e} = 245$ кэВ были зарегистрированы на расстоянии 110 км от ИК-25. Интенсивность электронных потоков медленно уменьшается при увеличении параметра p_1 подобно амплитуде b_{tf} (9.6 кГц) и расчетных значений для нормированной скорости роста элект-



 $\gamma^{h}/\omega, 10^{-2}$ 10.0 8.0 6.0 10^{-} $\gamma^k/\omega_ 10^{-2}$ $e_{lf} \, 10^{-5} \, \mathrm{mB/m/Fu}^{1/2}$ $\omega/2\pi = 9.6 \text{ kFy}$ 4 3.5 1.5 149 Гц $e_{lf^{\prime}} 10^{-2}$ 1 0.5 $J_p, (cm^2 \cdot K \ni B \cdot c \cdot cT)^{-1}$ 10^{8} $\varepsilon_n = 33 \Im B$ 10⁷ 10^{6} 105 10^{4} $\varepsilon_a = 130 \Rightarrow B$ 10^{7} 10^{6} 10^{5} 10^{4} 3 2 p_1 1 *Рис. 5.* Нормированные скорости γ^h / ω и γ^k / ω_{-} роста

Рис. 4. Скорости роста электромагнитной неустойчивости γ^h / ω ($\omega \approx \omega_{ce} / 6$, n = 1, $\theta \approx 0.04$) и пучково-плазменной неустойчивости γ^k / ω_{-} ($\omega \approx \omega_{-}$, n = 0, $\theta \approx 0.36$); амплитуды магнитной и электрической составляющих КНЧ-ОНЧ-волн $b_{ij'}$, e_{ij} , измеренные на спутнике ИК-25, а также аномальные потоки электронов, измеренные на субспутнике «Магион-3» («1е» — $\alpha_{p1} \approx 20...30^\circ$) представлены в зависимости от параметра $p_1 = |\omega_m - \omega_{be}| / \omega_{LH}$, орбита 201

ЭМН- и ППН-неустойчивостей относительно возбужде-

ния свистовых и продольных волн ($\theta \approx 0.34$), рассчитан-

ные для постоянной величины расстройки ($\delta \omega \equiv |\delta \omega_0|$);

амплитуды электрических составляющих КНЧ-ОНЧ-волн

 $e_{\rm ff}$, а также аномальные потоки ионов $J_{\rm p}$ (для питч-углов

 $\alpha_{p5} \approx 20...30^{\circ}$) и электронов $J_e (\alpha_{p4} \approx 20...30^{\circ})$, измерен-

ные спектрометром MPS/PPS на субспутнике представ-

лены в зависимости от параметра $p_1 = |\omega_m - \omega_{be}| / \omega_{LH}$,

орбита 202

ромагнитной неустойчивости. На этих рисунках представлены экспериментальные результаты регистрации поперечной и продольной составляющих квазистационарного (0.1-2 Гц) магнитного и электрического полей δB_{\perp} , δE_{z} (ИК-25) соответственно, а также потоки быстрых частиц. Можно провести сравнение этих данных со скоростью роста электромагнитной γ^h и пучковой γ^{*k*} неустойчивостями, однако большее внимание привлекает особенность вблизи $p_1 \sim 1$ (рис. 4, 5). Несмотря на то что в уравнениях (11), (13) нет какой-либо явной особенности относительно возбуждения волн нижнегибридной частоты, эта особенность все-таки наблюдается для измеряемых величин вблизи значений $p_1 \sim 1$, как можно видеть на рассматриваемых рисунках. Эти резонансные эффекты никак нельзя назвать случайными, поэтому можно сделать вывод о наличии особого взаимодействия для волн пространственного заряда пучка и волн, возбуждаемых в результате модуляции тока пучка в камере электронного ускорителя. Несмотря на то что в рассматриваемых случаях частоты ω_{IH} и ω_{ni} очень близки по величине, возбуждение нижнегибридной частоты является более вероятным и понятным с точки зрения реализации распадных механизмов. Необходимо также подчеркнуть, что все представленные данные не дают достаточно полного представления о взаимодействии триплета волн ω_m , ω_{be} , ω_{LH} в рассматриваемых условиях. Вычисление инкрементов γ^h , γ^k , а также плотности заряда пучка n_{be} проведено для различных значений параметров, таких как эффективная глубина модуляции р', не равная 100 %, расходимость электронного пучка ($\Delta' \alpha_0 \sim$ ~ 2...5° в зависимости от угла α_{ne}), расстройки $\delta \omega$, и других. Флюктуации этих параметров имеют спекулятивный характер и вычисляются в процессе загрузки комплексной программы. Величины, входящие в уравнение (1), максимально сглажены для того, чтобы исключить нежелательные случайные резонансные зависимости, так как первоначальные условия инжекции электронов связываются со спокойным стартом, и только потом возникают эффекты пучковоплазменной неустойчивости. Тем не менее, при длительной (порядка 1 с) инжекции электронного пучка какая-то обратная связь должна иметь место, т. е. должна существовать зависимость стартовых условий от эффектов инжекции пучка в плазму. Можно также считать оправданным использование в первом приближении модели полого электронного пучка, соответствующей стадии свободного гировращения электронов в высоких слоях ионосферы. Также сформулируем основные промежуточные результаты из рис. 4, 5.

• Подтверждаются волновые ОНЧ-резонансы вблизи соотношения частот триплета волн $p_1 = = |\omega_m - \omega_{be}| / \omega_{LH} \sim 1$ [14].

• Интенсивность дифференциальных потоков заряженных частиц (электронов, ионов) в различных диапазонах энергий имеет максимум вблизи $p_1 \ge 1$ и далее обнаруживает зависимость от скорости роста поперечных волн в результате электромагнитной неустойчивости.

Вспышки потоков быстрых электронов с энергией $\varepsilon_{1a} = 245$ кэВ и медленно спадающая величина инкремента вдоль оси *p*₁ представлены для витков 201, 202. Аналогия в поведении амплитуды флюктуаций послужила поводом для изучения функциональной зависимости этих величин от отношения скорости роста к частоте возбуждаемых свистовых волн $p \equiv p_2 = \gamma^h / \omega$ $(\omega \approx \omega_{ce}/6, n=1, \theta \approx 0.04)$. Рис. 6 демонстрирует поведение потоков электронов с энергией $\varepsilon_{\gamma_e} = 101$ кэВ (зарегистрированных для перпендикулярного к оси z' направления «2е») в виде последовательности точек (без линий) в зависимости от нормированной скорости роста возбуждаемых волн на 1-й гармонике электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в условиях нормального эффекта Доплера, но без учета конкретного механизма взаимодействия свиста с ионосферными электронами. Некоторая группа из этих точек с экспоненциально растущей амплитудой (максимальные амплитуды) являются свидельством резонансного взаимодействия типа «волна—частица» для свистовых волн. Данные на рис. 6, полученные в активном эксперименте на витке 202, представленны в зависимости от расстройки резонанса для пяти частотных диапазонов. По этим пяти группам данных можно сделать вывод, что



Рис. 6. Дифференциальные потоки электронов с энергией $\varepsilon_{2e} = 101 \text{ кэВ}$ («2е») в зависимости от скорости роста электромагнитной неустойчивости для пяти различных интервалов расстроек $\Delta \omega : a, \, \delta, \, e, \, e, \, \partial - \omega / \omega^* \approx 0.419$, 0.457, 0.506, 0.618, 0.708 соответственно ($\omega^* \sim \omega_{ce} / 6$), где пунктирный сплайн f(x) является экспоненциальной функцией GNUPLOT для аппроксимации каждой из пяти групп данных с помощью метода наименьших квадратов, (орбита 202)

диапазон ∂ ($\omega \approx 0.708\omega^*$, $\omega^* \sim \omega_{ce} / 6$), возможно, очень близок к реальной частоте возбуждаемых свистовых волн, в то время как группа данных *а* ($\omega \approx 0.419\omega^*$) демонстрирует отсутствие какихлибо функционально растущих характеристик из-за большой расстройки резонанса. При даль-

нейшем уменьшении рассогласования с резонансом $\Delta \omega = |\omega - \omega^*|$ получается сильно размытая картина, что может быть связано с ограниченными возможностями метода. Очень трудно не заметить некоторое сходство в поведении аппроксимирующей кривой для отдельной группы экспериментальных точек (например для диапазона ∂ на рис. 6), или их максимальных значений с типичным видом спектрограммы свистящего атмосферика f(t), отражающей его дисперсию (t -время приема свиста с частотой f в точке наблюдения). Только в нашем случае представлены потоки частиц, поглощающих энергию свиста в разной степени в зависимости от величины расстройки резонанса.

Для относительно плотной ионосферной плазмы ($\omega_{pe} > \omega_{ce}$) возбуждение свистовой моды благодаря механизму ЭЦР в соответствии с уравнениями (11), (12) возможно для высокочастотной области вблизи ω_{ce} в зависимости от угла θ . Получение точных решений уравнения (12) относительно определения частоты возбуждаемых волн возможно для отдельных частных случаев, поэтому экспериментальные данные (потоки энергичных заряженных частиц), зарегистрированные на субспутнике «Магион-3», дают наглядный способ для проверки этих результатов.

В активном эксперименте с инжекцией пучка электронов появление стимулированных потоков энергичных электронов для двух взаимно перпендикулярных направлений «1е, 2е» на субспутнике «Магион-3» обусловлено первоначально процессами возбуждения электромагнитных волн и последующего их поглощения резонансными частицами. Первый механизм определяется условием ЭЦР-возбуждения свистовых волн на частоте $\omega = \text{Re}\omega + \delta\omega$

$$\operatorname{Re}\omega + \delta\omega = k_{z}u + n |\omega_{ce}|, \quad n = 0, \pm 1, \dots \quad (14)$$

а второй связан с механизмом резонансного взаимодействия электронов со свистами

$$\operatorname{Re}\omega = k_z v_e \cos \alpha_{pj} + m | \omega_{ce} |, \quad m = 0, \pm 1, \dots \quad (15)$$

где Re ω , $\delta\omega$ — частота возбуждаемых волн и расстройка резонанса соответственно. Здесь v_e — скорость резонансных электронов, а индекс j = 1, 2 обозначает номер направления «1е», «2е» для двух электронных датчиков спектрометра ДОК-А, или j = 1, 2, ... 6 для шести секторов регистрации датчиком мягких электронов SEA (МПС/ППС). Следует подчеркнуть, что показанное на рис. 1 геометрическое определение питч-угла регистрации α_{pj} для частиц, влетевших в аппертуру датчика, должно использоваться как дополнение до 180°. Если оба механизма реализуются, то может быть рассмотрено следующее соотношение

$$k_{z}(u-v_{e}\cos\alpha_{ni}) = \delta\omega + (m-n).$$
(16)

Эти два типа взаимодействия были изучены по данным измерений в зависимости от соотношения $p \equiv p_3 \approx k_z u / (\text{Re}\omega - n | \omega_{ce} |)$ при условии возбуждения механизма ЭЦР или параметра $p \equiv p_4 \approx k_z (u - v_e \cos \alpha_{pj}) / (\delta \omega + (m - n) | \omega_{ce} |)$, соответствующего отношению (16). Результаты эксперимента (потоки частиц, амплитуды полей), стимулированные в результате реализации резонансных соотношений (14)—(16), соответствуют значениям $p_3 \sim 1$ и $p_4 \sim 1$, определяемым с учетом реальных и численных значений параметров в системе «плазма — пучок».

Рис. 7 демонстрирует поведение потоков быстрых электронов ($\varepsilon_{1e} = \varepsilon_{2e} = 43$ кэВ), зарегистрированных для двух взаимно перпендикулярных направлений «1e», «2e», возмущений квазипоперечной составляющией магнитного поля $\delta B'_{\perp}$ в зависимости от значения параметра p_3 (n = 1). Очевидно, что только некоторая часть данных о потоках частиц связана с инжекцией электронов с основного спутника. Общее число измерений (точек) для любой из величин на рис. 7 около 1000 (некоторые из них на оси p_3 совпадают). Поэтому эти точки можно трактовать с точки зрения распределения плотности аномальных потоков электронов на оси р₃. Например, потоки электронов J_{2e} имеют тренд в распределении плотности данных с увеличивающейся интенсивностью по мере того, как $p_3 \rightarrow 1$, т. е. при выполнении условий для ЭЦР-резонанса (14). Если сравнить эти данные с нормированной скоростью роста свистовых волн (вверху на рис. 7), то можно обнаружить, что тренды в распределении потоков J_{γ_e} (точек с повышенной плотностью) в большей мере соответствует





Рис. 7. Скорость роста ЭМН γ^h / ω ($\theta \approx 0.34$), потоки быстрых электронов (DOK-A) для двух взаимно перпендикулярных направлений «1» ($\varepsilon_{1e} = 43$ кэВ, $\alpha_{p1} \approx 20...30^\circ$) и «2» ($\varepsilon_{2e} = 43$ кэВ, $\alpha_{p2} \approx 60...70^\circ$), а также возмущения поперечной составляющей магнитного поля δB_{\perp} (на «Магион-3») представлены в зависимости от параметра $p_3 = k_z u / (\omega - n | \omega_{ce} |)$ для расстройки резонанса $\Delta \omega \approx 0.60 \omega^* (\omega^* \sim \omega_{ce} / 6)$, орбита 202. Результаты соответствуют условию возбуждения свистов при электронном циклотронном резонансе (ЭЦР)

поведению γ^h/ω , чем потоки J_{1e} с небольшими питч-углами к магнитному полю B'_0 . В тоже время минимальные значения потоков J_{1e} имеют ярко выраженную тенденцию к увеличению интенсивности по мере того, как увеличивается расстройка резонанса и увеличивается значение параметра p_3 . Вычисление скорости роста свистовых волн произведено для упомянутого выше



Рис. 8. Потоки быстрых электронов с энергией $\varepsilon_{1,2e} = 101 \text{ кэВ}(a, e), \varepsilon_{1e} = 63 \text{ кэВ}(b), \varepsilon_{2e} = 180 \text{ кэВ}(b) представлены в зависимости от параметра <math>p_4 \approx |k_z|(u-v_e \cos \alpha_{p2})/|\omega_{ce}|(m = 0, n = 1, \delta \omega << \omega_{ce})$, соответствующего двойному резонансному механизму (ЭЦР+ЧР) для значений параметра $p_4 \approx 1...1.5$, где v_e — скорость электронов с энергией $\varepsilon_{2e} = 101 \text{ кэВ}$ (ДОК-А), орбита 202

случая 2 при выборе расстройки резонанса, когда $\delta \omega \equiv \delta \omega_0$. В этом случае изменения скорости роста вызваны не только из-за вариаций параметров ионосферной плазмы и пучка, но в большей степени благодаря заметным вариациям потоковой скорости инжектированных электронов *и*, или ускоряющего напряжения в камере ускорителя ЭП. Квазипоперечная составляющая магнитного поля $\delta B'_{\perp}$ представлена в нижней части рис. 7. Амплитуда поперечных возмущений $\delta B'_{\perp} = (\delta B'_x^2 + \delta B'_y^2)^{1/2}$ достигает 500 нТл, а максимум смещен в сторону резонанса. Можно сделать вывод, что природа сильных возмущений магнитного поля в отдаленной зоне инжекции связана с резонансными условиями возбуждения электромагнитных волн, хотя очевидно, что это только косвенная связь и должен действовать дополнительный механизм передачи энергии в длинные масштабы, способные зафиксировать квазистационарные возмущения магнитного поля на субспутнике. Наиболее важные выводы из результатов рис. 6, 7 следующие.

• Чем больше инкремент неустойчивости ($\gamma^h \ll \omega$), или скорость роста амплитуды возбуждаемой электромагнитной волны, тем большее количество резонансных электронов испытывает возмущение по поперечным скоростям и питч-угловое перераспределение. Известно, что помимо циклотронного возбуждения свистов, максимальное затухание свистов также связано с циклотронным механизмом взаимодействия с электронами плазмы.

• Возмущения квазистационарного магнитного поля, зарегистртрованные на «Магион-3», связаны с волновой природой возмущений и генерацией нелинейных токов в ионосферной плазме.

Рис. 8 демонстрирует поведение аномальных потоков быстрых электронов в зависимости от комбинированного условия (16), соответствующему как условию возбуждения электромагнитных волн, так и последующему их взаимодействию с быстрыми электронами в условиях черенковского резонанса (ЭЦР + ЧР, $n=1, m=0, \theta \approx 0.4, j=2$) на витке 201. Как уже отмечалось, реальные значения параметра p_A сильно отличаются от единицы в зависимости от скорости частиц и питч-углов регистрации по направлениям j = 1, 2, другими словами,среди большого разнообразия зарегистрированных данных дифференциальных потоков частиц только одна какая-то группа электронов является резонансной, скорости которых удовлетворяют комбинированному условию $p_4 \approx 1$. Потоки частиц, соответствующие значениям $p_4 \approx$ ≈ 1...1.5, являются именно такими, скорости которых реально возмущены в результате механизма ЭЦР + ЧР. Как видно из рис. 8, измене-

ние интенсивности потоков электронов в зависимости от p_4 имеет регулярный характер, что заметно отличает его от предыдущих. Результаты регистрации потоков в диапазоне $p_4 \approx -0.5...-1$ и $p_4 > 2$, могут быть интерпретированы как потоки, возмущенные в результате других механизмов взаимодействия. Аномальные потоки с энергией $\epsilon_{_{2e}} = 101$ кэВ сильно подавлены для $p_4 \approx 1...1.5$, значения которого определены именно для этих частиц (рис. 8, г), так же, как и потоки с энергией $\varepsilon_{1e} = 101$ кэВ и j = 1(рис. 8, а), в то время как одновременно измеренные потоки частиц с энергиями $\epsilon_{2e} = 180$ кэВ (рис. 8, *в*) и $\epsilon_{le} = 63$ кэВ (рис. 8, *б*) имеют изменчивый характер в этом диапазоне p_4 . Что касается разных по характеру возмущений потоков электронов (усиление или подавление), зарегистрированных для рассматриваемых резонансных случаев, то можно предположить, что все эти эффекты являются следствием взаимодействия с правосторонней циркулярно-поляризованной электромагнитной волной, конечным результатом которого есть питч-угловое рассеяние резонансных частиц.

Спектры электронных потоков, зарегистрированные прибором ДОК-А (рис. 8), представлены на рис. 10 для различных значений параметра в диапазоне $p_4 \approx 1...1.5$. Интенсивность потоков на спектрах дифференциальных потоков электронов заметно увеличена в диапазоне энергий $\varepsilon_{a} = 20...30$ кэВ для всех направлений 1, 2, но ослаблены в средней энергетической части спектра. Схожие эффекты подавления спектров низкоэнергичных электронов были обнаружены в активном эксперименте с ВЧ-излучением дипольной антенны для изучения стимулированных всплесков заряженных частиц [12]. Однако в этом эксперименте уменьшение электронных потоков было зарегистрированно сразу после короткого ВЧ-импульса в течение 10 мс, когда ВЧ-излучение уже было отключено. Эти явления были интерпретированы как рассеяние электронных потоков в области сильной плазменной турбулентности, стимулированной ВЧ-излучением бортового радиопередатчика. Более полное изучение аналогичных явлений, индуцированных в результате инжекции пучков



Рис. 9. Экспериментальные потоки электронов с энергиями $\varepsilon_e = 47$ эВ и 510 эВ (верхние и нижние кривые соответственно) представлены в зависимости от параметра $p_4 \approx |k_z|(u-v_e\cos\alpha_p)/|\Delta\omega_{ce}|$ ($m = 1, n = 1, \Delta\omega <<\omega_{ce}$), v_e — скорость электронов с энергией $\varepsilon_e = 1.416$ кэВ, $\alpha_p \approx 145...160^\circ$. Потоки, зарегистрированные в результате реализации двойного циклотронного резонанса для возбуждения и поглощения свистовых волн, соответствуют значениям параметра $p_4 \approx 0.75...1.35$. Резонансное смещение представлено в зависимости от различных интервалов расстроек $\Delta\omega: a, \delta, e, c - \omega/\omega^* \approx 0.5679, 0.5168, 0.4568, 0.4057 соответственно (<math>\omega^* \sim \omega_{ce}/6$); и питч-углов $\alpha_{p5} \approx 48...73^\circ$ для фрагментов a, δ, e и $\alpha_{p6} \approx 20...45^\circ$ для фрагмента e; орбита 202

заряженных частиц может быть продолжено по результатам эксперимента АПЭКС с привлечением новых данных по волновым ОНЧ-КНЧ- и ВЧ-измерениям, зарегистрированным на субспутнике.



Puc. 10. Спектры электронных потоков J_{1e} , J_{2e} , зарегистрированные спектрометром ДОК-А для значений параметра $p_4 \approx 1.15$ (a, δ), и $p_4 \approx 1.41$ (e, e) для случая, представленного на рис. 8; пунктирные линии обозначают уровни невозмущенных потоков J_{1e}^0 , J_{2e}^0 , орбита 202

Для подтверждения большого разнообразия механизмов взаимодействия на рис. 9 приведены потоки электронов мягких энергий, зарегистрированные на витке 202 спектроанализатором МПС/ППС для двух энергетических ступеней регистрации 47 и 510 эВ. Данные отобраны в результате выполнения двух циклотронных механизмов взаимодействия: 1) возбуждения свистовой моды с помощью рассмотренного механизма (см. п. 3.3) и 2) ее поглощения электронами ионосферной плазмы при циклотронном механизме взаимодействия в

условиях нормального эффекта Доплера. Циклотронный резонанс возможен для достаточно больших расстроек $\delta\omega_0$ при возбуждении длинноволновых свистов пучком электронов, несмотря на то что скорость роста возбуждаемых волн при этом уменьшается. Следует также подчеркнуть, что как и в предыдущем случае, для черенковского механизма взаимодействиия частиц со свистовыми модами, резонансные условия накладывают очень жесткие условия для его выпонения. Это означает, что экспериментальное подтверждение рассматриваемым



Рис. 11. Спектры электронных потоков мягких энергий (МПС/ППС), зарегистрированные для значений параметра $p_4 \approx 1.08$ и разных питч-углов регистрации для случая, представленного на рис. 9; пунктирными линиями обозначены уровни невозмущенных потоков электронов J_{e0} , питч-углы $\alpha_{p1} \approx 151...176^{\circ}$ (*a*), $\alpha_{p2} \approx 132...157^{\circ}$ (*b*), $\alpha_{p5} \approx 48...73^{\circ}$ (*b*), $\alpha_{p6} \approx 20...45^{\circ}$ (*c*), орбита 202

механизмам возможно для достаточно узкого диапазона параметров, или соотношения скоростей (энергий)/питч-углов регистрации/резонансных расстроек. Например, на рис. 9 пик аномальных потоков электронов с энергией 510 эВ распределен вблизи резонансных значений параметра $p_4 \sim 1$, рассчитанных для энергий $\varepsilon_e = 1.416$ кэВ, а не 510 эВ. Несоответствие вызвано скорее флюктуациями численных и измереннных физических параметров, а также модельными погрешностями, но это не проти-

воречит рассмотренным механизмам циклотронных резонансов.

На рис. 11 приведены спектры электронов мягких энергий, однако, как и на рис. 10, они являются в достаточной мере осредненными функциями времени, так как получены за время активной фазы эксперимента без точной привязки по времени. И если пик интенсивности дифференциальных потоков электронов вблизи 1—3 кэВ можно связать с циклотронным резонансом, то этого никак нельзя сделать в отноше-

нии электронов с энергией 10—100 эВ в рамках рассматриваемых механизмов.

Возбуждение свистовых волн при инжекции электронов в условиях нормального эффекта Доплера (п. 3.3) и результаты взаимодействия с частицами ионосферной плазмы в широком диапазоне энергий представлены на рис. 4—11. На них представлены измерения волн и полей в двух точках пространства, а также результаты численных симуляций для различных моделей взаимодействия плазмы и пучка, которые получены по результатам текущих измерений («на лету») и, таким образом, были одним из основных инструментов и изучении неустойчивостей и механизмов взаимодействия, а также критерием для отбора данных.

5. ВЫВОДЫ

Экспериментальное изучение циклотронных механизмов стимуляции аномальных потоков заряженных частиц, возмущений составляющих квазипостоянного магнитного и КНЧ-ОНЧ-поля, а также ионных потоков тепловой плазмы проведены по данным активного космического эксперимента с косой конфигурацией инжекцией электронного пучка сквозь ионный. Представленные результаты получены для двух витков (201, 202) с очень схожими параметрами ионосферной плазмы. Можно сформулировать следующие основные результаты активного эксперимента, проведенного в двойной спутниковой системе типа «мать—дитя».

За время инжекции электронного пучка с основного спутника ИК-25 были обнаружены аномальные потоки быстрых электронов спектрометром заряженных частиц, размещенном на субспутнике «Магион-3». Возмущения электронных потоков в диапазоне энергий 20...30 кэВ связаны с возбуждением свистовых волн на 1-й гармонике электронного циклотронного резонанса в условиях нормального эффекта Доплера; затем распространяющиеся назад к точке инжекции волны взаимодействуют с быстрыми электронами в условиях черенковского резонанса. Результататом этих двух рассмотренных механизмов является появление аномальных электронных потоков с энергией вплоть до 100 кэВ.

В активной фазе работы инжекторов с помощью ионной ловушки на «Магион-3» зарегистрированы с некоторой задержкой почти синхронные с инжекцией ионов ксенона вариации ионных потоков тепловой плазмы в - x'-направлении (противоположно вектору скорости субспутника). Ионы тепловой плазмы очень чувствительны к возбуждению спектра УНЧ-КНЧ-волн при инжекции ионного пучка, как следует из эксперимента на витке 201. Подобное поведение ионных потоков не повторилось на витке 202. Напротив, наблюдались резкие изменения ионных потоков, когда частота модуляции электронного пучка достигала $\omega_m/(2\pi) =$ = 62.5 кГц, близкой к частоте $\omega_{ac}/2\pi/6 \approx 90...$ 100 кГц (в настоящей работе используется как частота возбуждаемых свистов). Разница этих двух частот является расстройкой резонанса. Предполагается, что наблюдаемое резонансное возмущение ионных потоков тепловой плазмы есть результат взаимодействия с длиннопериодным цугом волн, стимулированным вследствие нелинейного взаимодействия волн свистового диапазона.

Механизм циклотронного взаимодействия свистовых волн с различными группами электронов в ионосфере подтверждается данными регистрации аномальных потоков мягких электронов на 1-й циклотронной гармонике в условиях нормального эффекта Доплера. Резонанс наблюдается в диапазоне энергий 1—3 кэВ для нисходящих (к Земле) электронных потоков.

Один из наиболее интересных результатов связан с КНЧ-ОНЧ-эффектами, наблюдаемыми в диапазоне, где соотношение частот триплета волн соответствует условию $|\omega_m - \omega_{be}|/\omega_{LH} \sim 1$. Эти волновые эффекты могут быть интерпретированы как параметрическое взаимодействие волн постранственного заряда пучка и волн в плазме, индуцированных при модуляции электронного пучка в камере ускорителя (ондулирующих волн). Вследствие этого, когда возбуждаемые биения волн происходят вблизи нижнегибридной частоты, наблюдается рост широкого спектра КНЧ-ОНЧ-волн.

Экспериментально зарегистрированы аномально большие возмущения порядка 1 мкТл составляющих магнитного поля в отдаленной точке инжекции на субспутнике «Магион-3» (на расстоянии от основного спутника $d \ge 100$ км), вызванные инжекцией электронного пучка с параметрами (0.1 A, 10 кэВ). Предполагается, что природа этих возмущений связана с условиями возбуждения свистящих атмосфериков при инжекции электронов.

Большая часть представленных результатов отражает развитие пучковой, или пучково-анизотропной неустойчивостей в ионосферной плазме, механизмы которых в нашей работе были объектом исследований. Но некоторые из полученных результатов являются следствием более сложных комбинационных (нелинейных) механизмов взимодействия, развивающихся при инжекции пучка в пучок. Эти механизмы вызывают интерес во многих экспериментальных ситуациях, включая и активные эксперименты в космосе.

В этой работе ряд экспериментальных данных не представлен в явном виде, но использовался при вычислении различных параметров пучково-плазменного взаимодействия, и следовательно, также являются результатами комплексного эксперимента.

Авторы выражают благодарность 3. Клосу, X. Ротхагль, В. Докукину и Я. Соболеву за поддержку и помощь при выполнении этой работы. K. Кудела благодарит проект VEGA 02/0040/13 за поддержку.

- 1. Баранец Н. В., Ружин Ю. Я., Афонин В. В. и др. Квазипоперечная к геомагнитному полю инжекция электронных пучков по данным спутника «Интеркосмос-25»: проект АПЭКС // Космічна наука і технологія. — 2000. — 6, № 5/6. — С. 49—62.
- Баранец Н. В., Соболев Я. П., Чобану М. и др. Развитие пучковой неустойчивости при инжекции слабоэнергичного электронного пучка в ионосферную плазму // Физ. плазмы. — 2007. — 33, № 12. — С. 1086—1106.
- 3. Волокитин А. С., Ружин Ю. Я., Коробейников В. Г., Докукин В. С. Магнитные эффекты инжекции струи плазмы в ионосфере (эксперимент АПЭКС) // Геомагнетизм и аэрономия. — 2000. — **40**, № 3. — С. 133— 137.
- Искусственные пучки частиц в космической плазме / Под ред. Б. Гранналя. — New York: Plenum, 1982.

- 5. *Киценко А. Б., Степанов К. Н.* Про проходження пучка заряджених частинок через магнитоактивну плазму // Укр. физ. журн. — 1961. — **6**, № 3. — С. 297— 307.
- 6. *Михайловский А. Б.* Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1975. Т. 1.
- Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. М.: Гидрометеоиздат, 1989.
- Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде / Под ред. Я. Б. Зельдовича. — М.: Мир, 1980.
- 9. Ораевский В. Н., Соболев Я. П., Жузгов Л. Н. и др. Возбуждение магнитных полей при инжекции электронных пучков с борта спутника Интеркосмос-25 (АПЭКС) // Физ. плазмы. — 2001. — 27, № 4. — С. 343—349.
- 10. *Радиофизическая* электроника / Под ред. Н. А. Капцова. М.: Мир, 1978.
- Banks P. M., Raitt W. J. Observation of electron beam structure in space experiments // J. Geophys. Res. – 1988. – 93. – P. 5811–5822.
- Baranets N. V., Galperin Yu. I., Erokhin N. S., et al. Electron flux scattering in strongly turbulent plasma region // Adv. Space Res. – 1998. – 21, N 5. – P. 709–712.
- Baranets N. V., Ruzhin Yu. Ya., Erokhin N. S., et al. Acceleration of energetic particles by whistler waves in active space experiment with charged particle beams injection // Adv. Space Res. 2012. 49, N 5. P. 859–871.
- Baranets N. V., Sobolev Ya. P., Ruzhin Yu. Ya., et al. Excitation of HF and ULF-VLF waves during charged particle beams injection in active space experiment // J. Plasma Phys. Res. SERIES – 2009. – 8. – P. 251–256.
- Maehlum B. N., Maseide K., Aarsnes K., et al. Polar 5 -An electron accelerator experiment within an aurora // Planet. Space Sci. – 1980. – 28. – P. 269–279.
- Marshall J. A., Lin C. S., Burch J. L., et al. Spacelab 1 experiments on interactions of an energetic electron beam with neutral gas // J. Space Rockets. 1988. 25, N 5. P. 361–367.
- Mett R. R., Tataronis J. A. Current drive via magnetohydrodynamic helicity waves // Phys. Rev. Lett. – 1989. – 63, N 13. – P. 1380–1383.
- Přech L., Němeček Z., Šafránková J., Omar A. Actively produced high-energy electron bursts within the magnetosphere: the APEX project // Ann. geophys. — 2002. — 20. — P. 1529—1538.
- Roeder J. L., Sheldon W. R., Benbrook J. R., et al. X ray measurements during the ARAKS experiments // Ann. geophys. – 1980. – 36. – P. 401–409.

Стаття надійшла до редакції 30.05.14

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

Н. Баранець, Ю. Ружин, Н. Єрохін, В. Афонін, Я. Войта, Я. Шмілауер, К. Кудела, Я. Матишин, М. Чобану

РЕЗОНАНСНІ ЕФЕКТИ ВЗАЄМОДІЇ ХВИЛЬ І ЧАСТИНОК ПРИ ШТУЧНІЙ ІНЖЕКЦІЇ ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК В ІОНОСФЕРНІЙ ПЛАЗМІ

Вивчаються механізми взаємодії заряджених частинок іоносферної плазми з поздовжніми плазмовими і електромагнітними хвилями, збудженими при проведенні активного експерименту в іоносфері з одночасною інжекцією електронного та іонного пучків з борту космічного апарата «Інтеркосмос-25» (ІК-25). Результати вивчення пучково-плазмової нестійкості до збудження поздовжніх хвиль при інжекції електронного пучка раніше були представлені в нашій роботі [Физ. плазмы. — 2007. — 33, № 11. — С. 995—1013]. Специфічною особливістю експерименту, проведеного на витках 201, 202, була взаємна орієнтація інжекцій, при якій потоки заряджених частинок були інжектовані в одному напрямку вздовж магнітного поля В₀ вгору від Землі таким чином, що відносна форма інжекцій мала вигляд структури «пучок у пучку». Результати пучково-плазмової взаємодії для такої конфігурації були зареєстровані у подвійній супутниковій системі, що складається із станції ІК-25 і субсупутника «Магіон-3». Основну увагу приділено вивченню механізмів збудження електромагнітних хвиль у різних частотних діапазонах та їхньої взаємодії із зарядженими частинками іоносферної плазми, що призводить до прискорення/підсилення потоків частинок у полі електромагнітних хвиль. Розглянуто також збудження атмосфериків (свистів) на першій гармоніці електронного циклотронного резонансу в умовах нормального ефекту Допплера при інжекції електронного пучка в іоносферну плазму.

N. Baranets, Yu. Ruzhin, N. Erokhin, V. Afonin, J. Vojta, J. Smilauer, K. Kudela, J. Matisin, M. Ciobanu

RESONANCE EFFECTS OF WAVE-PARTICLE INTERACTIONS DURING ARTIFICIAL CHARGED PARTICLE BEAM INJECTIONS IN IONOSPHERIC PLASMA

We investigate the wave-particle interaction in the ionospheric plasma with longitudinal plasma and electromagnetic waves generated during active space experiments with simultaneous injection of electron and xenon ion beams from the Intercosmos-25 (IK-25) spacecraft. Some results of our study of the beam-plasma instability relative to the longitudinal wave excitation during the electron beam injection were early presented [Plasma Phys. Rep. – 2007. – 33, N 11. – P. 995–1013]. A specific feature of the active experiment carried out at orbits 201 and 202 was that charged particle flows were injected in the same direction along the magnetic field lines B_0 in such a way that produced the oblique beam-into-beam injection. Some results of the beam-plasma interaction for this configuration were registered by the double satellite system consisting of the IK-25 station and Magion-3 subsatellite. The emphasis is on the study of the electromagnetic wave excitation in different frequency ranges and the acceleration of energetic charged particles by the beam-induced waves in the nearsatellite plasma. Excitation of electromagnetic waves (whistlers) on the first harmonic of electron cyclotron resonance for normal Doppler effect during electron beam injection into ionospheric plasma is considered.

УДК 537.876.23

Д. Ф. Дудкін¹, В. О. Проненко¹, В. Є. Корепанов¹, С. І. Клімов²

¹Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Львів ² Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва, Росія

ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ У НАВКОЛОЗЕМНОМУ ПРОСТОРІ

Аналізується експериментально виявлене останнім часом на декількох супутниках явище випромінювання гармонік ліній електропередач, яке спостерігається в іоносфері. Отримані дані дають підставу наголошувати на необхідності постійного супутникового моніторингу іоносферних техногенних збурень для об'єктивного оцінювання та прогнозу космічної погоди. Припускається, що розвиток методу дозволить створити карту електромагнітного забруднення довкілля Землі в локальному та глобальному масштабах.

вступ

Одним з основних напрямків досліджень навколоземного космічного простору є вивчення й прогнозування космічної погоди. Про важливість цієї галузі науки свідчить велика кількість робіт [1, 6, 8, 15, 16, 19, 27]. Оцінки, пов'язані з космічною погодою, здійснюються не лише для технічних систем [14], але й для ділової активності. Зокрема, відома страхова компанія Ллойда опублікувала звіт про вплив космічної погоди на ризики бізнесу [31]. Вказані дослідження стосуються в основному оцінки впливу сонячної активності на іоносферу й атмосферу Землі (тобто досліджуються наслідки передачі енергії в напрямі Сонце — магнітосфера — іоносфера атмосфера — поверхня Землі) і, як правило, не враховують слабшу, але тим не менш істотну дію у зворотному напрямі потужних природних і техногенних процесів, які відбуваються на поверхні Землі. Факт такої зворотної дії є загальновизнаним, і інтерес до нього постійно збільшується у зв'язку зі зростанням виробничої діяльності людства.

Як показують останні результати спостережень, основну складову техногенного впливу становлять джерела електромагнітної (ЕМ) енергії, до яких належать потужні передавачі та випромінювачі в усьому діапазоні радіохвиль, електростанції, лінії електропередач і промислові об'єкти. Досить давно встановлено, що потужні наземні джерела ї споживачі електричної енергії викликають різні іоносферні явища, зокрема зміни ЕМ-поля і параметрів плазми в іоносфері, які, у свою чергу, впливають на стан атмосфери Землі. Можливі наслідки техногенної дії на іоносферу, при стійкій тенденції до збільшення, на сьогодні не відомі. Тому дуже важливим і актуальним завданням є проведення статистично достовірних досліджень варіацій іоносферних параметрів, пов'язаних зі впливом потужних техногенних чинників, передусім завдяки значному збільшенню виробництва електроенергії. Саме в цій галузі в 1970-х рр. було відкрито новий ефект — проникнення в іоносферу і навіть у магнітосферу гармонійного випромінювання ліній високовольтних електромереж (PLHR) в діапазоні частот 2—2.5 кГц [13, 17, 26].

Механізм формування PLHR та можливі наслідки цього явища для цивілізації, яка постійно збільшує виробництво електроенергії, ще досі не мають пояснення. Однак уже відомо, що системи виробництва електроенергії впливають на навколоземне середовище як у локальному

[©] Д. Ф. ДУДКІН, В. О. ПРОНЕНКО, В. Є. КОРЕПАНОВ,

С. І. КЛІМОВ, 2014

Широта, град



Рис. 1. Глобальний розподіл ЕМ-випромінювання в іоносфері в діапазоні частот 0.1—15 МГц (КОРОНАС-И, 31 березня 1992 р.)

масштабі, змінюючи стан іоносфери безпосередньо над лініями електромереж, так і у глобальному, створюючи у порожнині Земля — іоносфера ЕМ-коливання на частотах, пов'язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками. Одним з небезпечних наслідків цього явища є збільшення інтенсивності висипання заряджених часток з радіаційних поясів Землі, що досить часто спостерігається на борту штучних супутників Землі (ШСЗ) при реєстрації концентрації заряджених часток разом зі збільшенням впливу ЕМ-полів у іоносфері [25].

На сьогодні зрозуміло, що це явище потрібно вивчати з метою встановлення кількісних залежностей та можливих наслідків для нашого оточення при неминучому подальшому збільшенні виробництва електроенергії. Найзручніші можливості для спостереження за вивільненням ЕМенергії дає супутниковий моніторинг іоносфери та магнітосфери в діапазоні частот від десятків герц до десятків мегагерц із розширеною наземною підтримкою. При організації оперативного отримання даних і охопленні великих наземних площ такий моніторинг може стати ефективним інструментом для вивчення техногенного впливу на навколоземний космічний простір і, як наслідок, на космічну погоду, передусім з метою визначення ймовірності досягнення природними системами критичного стану.

Дб

У нашій статті зроблено короткий огляд різних експериментальних досліджень цих явищ та їхніх імовірних наслідків для довкілля Землі, а також попередньо аналізуються нові дані, отримані в експериментах на борту ШСЗ «Січ-1М» та «Чибис-М».

ВІДОМІ ФАКТИ

Терагенні ЕМ-ефекти, тобто ефекти, викликані потужними процесами, які відбуваються на поверхні та в надрах Землі, спостерігалися в іоносфері вже першими науковими ШСЗ. Зокрема, ЕМ-випромінювання, зареєстроване низькоорбітальними супутниками «Інтеркосмос-19», «Космос-1809», «Активний» і АРЕХ, підтвердило істотне збільшення інтенсивності високочастотних ЕМ-шумів над населеними районами Європи і Азії [23, 24, 28]. У роботі [28] за допомогою приладу SORS-1, встановленого на борту супутника КОРОНАС-И, досліджено глобальний розподіл ЕМ-випромінювання у частотному діапазоні 0.1—15 МГц. При цьому над Євразійським континентом виявлене посилення рівня сигналу над фоном близько 20 дБ (рис. 1). Ці спостереження підтвердили, що природне ЕМ поле в



Рис. 2. Можливий вплив гармонічного випромінювання ліній електропередач на земне середовище (дані [25])

навколоземному просторі сильно «забруднене» людською діяльністю. Незважаючи на довгу історію супутникових спостережень ЕМ-полів, на ЕМ-забруднення навколоземного простору зверталося досить мало уваги. Проте останні дані супутникових і наземних спостережень показують зростання кількості реєстрацій техногенних сигналів, і цілком можливо, що у майбутньому цей ефект може призвести до неконтрольованого нагрівання атмосфери та іоносфери з невідомими на сьогодні наслідками, тому він потребує детальних досліджень. Можна припустити, що найбільшу небезпеку становлять системи виробництва і передачі електроенергії, оскільки обсяг виробництва її постійно збільшується.

Лінії електропередач можуть простягатися до кількох тисяч кілометрів і фактично є джерелом ЕМ-поля — антенами, які працюють на промисловій частоті та її гармоніках. Струм у потужних лініях електропередач може досягати декілька тисяч ампер. При цьому в силових трансформаторах і промисловому устаткуванні споживачів він містить, окрім основної частоти, ще й вищі гармоніки, ефективність випромінювання яких підвищується зі зростанням їхнього порядку (частоти). Для розуміння ролі випромінювань на вищих гармоніках слід зазначити, що національними стандартами різних країн зазвичай регулюються коефіцієнти гармонійних складових напруги $K_{U(n)}$ та коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U . В ряді країн, наприклад США і Китаї, діє міжнародний стандарт IEEE Std 519-92, який пропонує такі норми для розглянутих величин: $K_U = 1.5\%$ і $K_{U(n)} = 1\%$. Ці норми мало відрізняються від норм європейського стандарту EN 50160.

Рис. 2 з роботи [25] ілюструє складність нелінійної взаємодії різних природних і техногенних чинників та показує, що вплив випромінювання ліній електропередач може викликати, у тому числі, й висипання енергетичних електронів з радіаційних поясів Землі. Фізика виявленого явища полягає у нелінійній взаємодії електричних і магнітних полів ліній електропередач з іоносферною/магнітосферною плазмою та зарядженими частинками в радіаційних поясах Землі.

Так, відомо, що ЕМ-поле ліній електропередач взаємодіє з плазмою іоносфери, зокрема призводить до нагрівання електронів [29]. У роботі [29] також доведено, що саме нагрівання електронів стало демаскуючим чинником передавача ВМС США у Вісконсіні. При цьому збільшення середньої температури електронів ($T_e = 300$ K) може досягати 10 %, залежно від часу доби і положення лінії. Такі відхилення можуть видатися



невеликими, проте цей чинник діє постійно, вдень і вночі. В результаті сукупний ефект може стати істотним, особливо якщо розглядати не одну лінію, а, наприклад, регіональну систему енергопостачання, яка охоплює велику площу.

Слід зазначити, що локальні іоносферні ефекти від ліній електропередач реєструються не тільки в космічних експериментах, а й при наземних спостереженнях. Так, у роботі [4] достовірно зареєстровано зміни в режимі електропостачання на території США в районі Нової Англії у магнітоспряженій точці (рис. 3). Ці результати були отримані за допомогою високочутливих магнітометрів LEMI-112А (розроблених у Львівському центрі Інституту космічних досліджень), встановлені на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Добре видно локальні ефекти від змін режиму роботи системи енергопостачання: зниження споживання в кінці тижня та, особливо, вихід усієї системи з ладу (blackout) через інтенсивну магнітну бурю 14 серпня 2003 р. Це підтверджує, що струми в лініях електропередач генерують випромінювання, яке викликає помітні зміни в іоносфері та магнітосфері. Фізичний механізм цього явища досліджується вже досить давно [5, 9], але дотепер повної картини ще немає.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

На сьогодні нагромаджено досить багато експериментальних супутникових підтверджень існування кластерів спектральних ліній гармонік мережі 50 (60) Гц (аж до 10—15 ліній), центрованих біля середньої частоти в досить широкому діапазоні (приблизно 1—15 кГц). У експерименті «Варіант» на борту супутника «Січ-1М», запущеного у 2004 р. [10], було отримано всього 11 файлів, і у трьох з них були зареєстровані досить інтенсивні гармоніки частоти 50 Гц, розташовані кластерами в діапазоні частот від 1.5 до 14 кГц. Наведемо приклад найцікавішої події, коли ШСЗ перебував над південною частиною

Рис. 3. Зміна інтенсивності І випромінювання 60 Гц, яка спостерігалась на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський»: *а* — порівняння реєстрованого випромінювання І (суцільна лінія, шкала зліва) з продукованим обсягом енергії Е (пунктирна лінія, шкала справа); б — усереднена за рік тижнева зміна інтенсивності випромінювання з частотою 60 Гц; *в* — денний хід інтенсивності лінії 60 Гц за три дні (13, 14 і 15 серпня 2003 р.). Вертикальна лінія — момент масштабного відімкнення електроенергії в Новій Англії (США) під час інтенсивної магнітної бурі 14 серпня 2003 р. [4]



Рис. 4. Траєкторія польоту супутника «Січ-1М» (*a*); *б, в, г* — гармоніки 50 Гц у ділянках частот близько 14, 3.4 і 1.4 кГц відповідно (тут *B*, пТл; *E*, мкВ/м; *J*, пА·см⁻²)



Рис. 5. Динамічний (*a*) та статичний (*б*) спектри рядів електричного поля, отриманих 25 березня 2006 р. о 19:13:32 UT при пролітанні супутника «Деметр» над територією Фінляндії [21], *в*, *г* — те ж для 21 вересня 2006 р. між 10:06:02 та 10:06:32 UT [22]



Рис. 7. Дані електричного каналу супутника «Чибис-М», отримані при пролітанні над територією Бразилії: a — динамічний спектр сигналу, δ — статичний спектр сигналу, e — зміна амплітуди сигналу 60 Гц, e — ділянка траєкторії супутника над територією Бразилії і лінії високовольтних передач [12] (час UTC + 3)





Рис. 8. Дані електричного каналу супутника «Чибис-М», отримані при пролітанні над територією південно-східної Азії та Японії: *а* — ділянка траєкторії супутника, *б* — динамічний спектр сигналу, *в* — статичний спектр сигналу



Аравійського півострова на висоті приблизно 340 км (див. кольорову вклейку, рис. 4, *a*). Особливістю цієї події була одночасна реєстрація кластерів гармонік 50 Гц відразу на декількох частотах — від 14 до 1.5 кГц (див. кольорову вклейку, рис. 4, *б*, *в*, *г* відповідно). Сигнали спостерігалися не лише в електричному, а й у магнітному полях та у варіаціях густини просторового струму (рис. 4, *в*, *г* відповідно). Зареєстровані сигнали, очевидно, викликалися струмами в лініях електропередач на території Арабських Еміратів, але загадкою залишається діапазон їхніх частот.

Як виявилося, такі кластери спостерігаються досить рідко — якщо через короткий термін роботи супутника «Січ-1М» були зареєстровані лише три такі події, то супутник «Деметер» (запущений у 2004 р.) успішно функціонував понад шість років, на його борту теж спостерігалися PLHR, але за весь цей час було ідентифіковано всього 146 таких випадків [20, 22]. При цьому виявилося, що гармоніки у кластерах можуть відстояти між собою як на 50 Гц, так і на 100 Гц. Як приклад, на рис. 5 (див. кольорову вклейку) показані динамічний (рис. 5, а) та статичний (рис. 5, б) спектри результатів вимірювання електричного поля, отримані 25 березня 2006 р. о 19:13:32 UT при пролітанні над територією Фінляндії [21]. При цьому різниця між сусідніми лініями складала 100 Гц. Подібні дані, отримані 21 вересня 2006 р. між 10:06:02 та 10:06:32 UT, подано на рис. 5, в, г. У цьому випадку різниця між сусідніми лініями складала вже 50 Гц [22].

Узагальнення накопиченої на той час інформації дозволило побудувати оцінки, подані на рис. 6: розподіл пікової інтенсивності *I* PLHR по широті φ (рис. 6, *a*) та усереднена кількість *N* подій, які спостерігалися на даній частоті (рис. 6, δ) [21]. На жаль, незважаючи на численні спроби, досі пояснення цьому ефекту немає. Навіть про ділянку, де утворюються PLHR, ідуть суперечки — розглядаються гіпотези, що вони або створюються через нелінійні взаємодії в іоносфері, або ж генеруються на землі через спотворення форми струму у мережах.

Поштовх до зверенення уваги на це явище дали результати, отримані в експерименті на ШСЗ «Чибис-М» (запущений 24 січня 2012 р. на





Рис. 6. Розподіл пікової інтенсивності *I* PLHR по широті (*a*) та усереднена кількість N подій, які спостерігалися на даній частоті (δ) [21]

майже кругову орбіту висотою 500 км, припинив роботу 15 жовтня 2014 р.). До складу КНА «Гроза» цього супутника входив магнітно-хвильовий комплекс (МХК), який складався з двох хвильових зондів і одного індукційного магнітометра, створених у Львівському центрі Інституту космічних досліджень, та приладу спектрального аналізу ПСА (розробка BL-Eelectronics, Угорщина) [3]. МХК вимірював одну електричну складову і три складові вектора магнітного поля в діапазоні частот 0.1 Гц — 40 кГц з метою дослідження варіацій плазмово-хвильових процесів у іоносфері під впливом грозової активності, а також відображення в іоносфері потужних природних і техногенних процесів, які відбуваються в системі ЛАІМ (літосфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера) [2]. Через високий рівень бортових завад, в основному від системи орієнтації та стабілізації супутника, практично всі дані магнітних каналів у ДНЧ-діапазоні виявилися непридатними для подальшого аналізу. Але дані давача електричного поля, який був розташований симетрично до корпуса супутника [2], виявилися набагато менше пошкоджені завадами, і спеціально створена програма «Denoise» дозволила ефективно і з високою чутливістю виділяти корисні сигнали у електричному каналі, особливо у моменти, коли систему орієнтації було відімкнено. Слід відзначити досить високу чутливість електричного каналу: незважаючи на те, що база електричного давача складала всього 0.42 м, його чутливість, визначена експериментально, була на рівні 4.24 · 10⁻⁶ В/(мкВ/м), а рівень шумів — на рівні 0.14 та 0.04 (мкВ/м)Гц^{1/2} на частотах 0.1 Гц та 10 Гц відповідно.

На жаль, найімовірніше через невелику кількість даних, отриманих у високочастотному режимі опитування МХК, за більш як два роки роботи не було зареєстровано жодного високочастотного явища PLHR. Натомість було досить багато випадків реєстрації першої гармоніки електромережі 50 (60) Гц (на сьогодні знайдено загалом 33 реєстрації, сім з яких у денний локальний час, але оброблено ще не всі дані).

Так, на рис. 7 (див. кольорову вклейку) показано результати вимірювань, отримані від давача напруженості електричного поля при пролітанні ШСЗ «Чибис-М» над територією Бразилії (рис. 7, а — динамічний спектр сигналу, рис. 7, б його статичний спектр, отриманий методом Велча, який забезпечує зниження рівня шуму за рахунок зменшення роздільної здатності по частоті [7]). Обробка даних дозволила виявити ще одну цікаву особливість — декілька моментів підвищення амплітуди сигналу 60 Гц під час пролітання (рис. 7, в). При аналізі наявної в інтернеті карти розташування високовольтних ліній електропередач на території Бразилії (рис. 7, г [12]) з'ясувалося, що кожен з цих піків відповідав моменту пролітання супутника над позначеними на карті високовольтними лініями (на траєкторії польоту ці моменти виділені темнішим кольором). Таке явище виявлено вперше і пізніше підтвердилось ще декількома спостереженнями.

Не менш цікаві результати вимірювань отримані з борту супутника «Чибис-М» при його пролітанні над південно-східною Азією та Японією (див. рис. 8, а на кольоровій вклейці). На рис. 8, б показаний динамічний спектр сигналів, а на рис. 8, в — статичний спектр. Добре видно основні гармоніки з частотами 50 та 60 Гц, які реєструються одночасно, що можна пояснити тим, що в Японіі використовуються обидві ці частоти. Крім того, на обох спектрах чітко видно перші декілька гармонік шуманівських резонансів (ШР). Це другий випадок реєстрації гармонік ШР в іоносфері в історії супутникових спостережень. Зауважмо, що вперше гармоніки ШР були виявлені в іоносфері на супутнику C/NOFS, який, на відміну від короткого диполя на борту ШСЗ «Чибис-М», мав давач електричного поля з базою в 20 м [30]. Згідно з традиційними уявленнями, ШР обмежені висотами 50-70 км. Також вважалося, що КНЧ-випромінювання (50 і 60 Гц) від ліній електромереж не виходить за провідні шари верхньої атмосфери [18]. З цього мало б випливати, що ШР і перші гармоніки мережі не можуть спостерігатися низькоорбітальними супутниками Землі. Проте у пізніших роботах [11, 32] вказано, що проникання гармонік ШР в іоносферу все-таки можливе через їхнє неповне затухання, і вони можуть бути виміряні при наявності на борту високочутливих давачів.

Зрозуміти механізм проникнення перших гармонік мережі надзвичайно важливо, оскільки це відкриває можливість створення системи моніторингу локальних засобів виробництва й споживання електроенергії в глобальному масштабі, у тому числі й прихованих.

Підсумовуючи, можна виділити такі особливості відображення в іоносфері гармонійного випромінювання електромереж.

1. Реєстрація високочастотних гармонік PLHR в іоносфері зустрічається досить рідко: за шість років роботи ШСЗ ДЕМЕТЕР виявлено лише 146 випадків.

2. В основному середня частота кластерів PLHR зосереджена в ділянці 2...2.5 кГц, хоча

спостерігались і частоти 1.5...14 кГц (поки що всього три реєстрації на борту ШСЗ «Січ-1М»).

3. Лінії у кластерах можуть бути віддалені одна від одної як на 50 (60) Гц, так і на 100 (120) Гц, при цьому їхня інтенсивність при віддаленні від середньої частоти спадає.

4. Спостерігається і пряме проходження сигналів з частотою 50 (60) Гц в іоносферу, при цьому їхня інтенсивність вища безпосередньо над джерелами сигналів (в даному випадку — високовольтними лініями).

5. Перша гармоніка частоти мережі надійно реєструється на всіх ділянках орбіти супутника, незалежно від часу (день/ніч), на відміну від шуманівських резонансів.

ВИСНОВКИ

Розглянуті експериментальні факти повинні стимулювати дослідження взаємодії потужних ЕМ-полів, пов'язаних з постійним зростанням виробництва електроенергії та іншими відповідними техногенними чинниками, з плазмою навколоземного космічного простору і їхнього відповідного впливу на космічну погоду.

Наявні експериментальні дані, а також ряд теоретичних оцінок дозволяють з високою достовірністю стверджувати, що постійний супутниковий моніторинг іоносферних і магнітосферних техногенних ЕМ-збурень в КНЧ-діапазоні може стати ефективним засобом об'єктивної оцінки й прогнозу космічної погоди і рівня споживання електроенергії, його денних або сезонних змін. На підставі такого моніторингу (з відповідним вимірюванням ЕМ-полів техногенного походження і параметрів іоносферної/магнітосферної плазми) можна передбачити можливість постійного контролю споживання енергії як у локальному (у межах однієї країни або навіть одного потужного споживача), так і у глобальному масштабах.

Подальший розвиток такого моніторингу дозволить створити карту ЕМ-обстановки над кожною країною і здійснювати як контроль техногенного ЕМ-забруднення навколоземного простору, так і прогноз космічної погоди у локальному і глобальному масштабах. Можна припустити, що надалі стане можливою і локалізація прихованих потужних споживачів енергії. Автори вдячні команді мікросупутника «Чибис-М» за сприяння в отриманні телеметричних даних.

Ця робота виконана при частковій підтримці контракту № 4-03/13 з ДКАУ і проекту SEAM № 607197 за програмою ЄС FP7.

- 1. Владимирский Б. М. Космическая погода климат и социальные процессы // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2011. — **107**, № 1. — С. 189—209.
- 2. Зелёный Л. М., Гуревич А. В., Климов С. И. и др. Академический микроспутник ЧИБИС-М // Космич. исслед. — 2014. — 52, № 1. — С. 1—13.
- Климов С. И., Вавилов Д. И., Готлиб В. М. и др. Исследование ионосферной электромагнитной активности на микроспутнике «Чибис-М» // Физика плазмы в Солнечной системе: Сб. тез. 8-й ежегод. конф. — М., 2013. — С. 61.
- Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. 14, № 4. С. 367—376.
- 5. *Молчанов О. А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985. 224 с.
- Парновский А. С., Ермолаев Ю. И., Жук И. Т. Космическая погода история исследования и прогнозирование // Космічна наука і технологія. 2010. 16, № 1. С. 90—99.
- Barbé K., Pintelon R., Schoukens J. Welch method revisited: nonparametric power spectrum estimation via circular overlap // IEEE Trans. Signal Process. – 2010. – 58. – P. 553–565.
- Bothmer V., Daglis I. A. Space weather. Physics and effects / Springer, Series: Springer Praxis Books. Subseries: Environmental Sciences. – 2007. – Vol. 38. – 438 p.
- Bullough K., Kaiser R. Strangeways H. J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1985. – 47, N 12. – P. 1211– 1223.
- 10. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARI-ANT – first results from wave probe // Adv. Space Res. – 2009. – **43**, N 12. – P. 1904–1909.
- Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2014. — 117. — P. 81— 87.
- Francisco C. M. Connecting renewable power plant to the Brazilian transmission power system / The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program. — Washington, DC (USA). — 2012. — 37 p.

- Helliwell R. A., Katsurakis J. P., Bell T. F., Raghuram R. VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation // J. Geophys. Res. – 1975. – 80, N 31. – P. 4249–4258.
- Impacts of severe space weather on the electric grid // Report JSR-11-320, November, 2011. Virginia (USA): The MITRE Corporation, McLean, 2011. — 101 p.
- Journal of Space Weather and Space Climate, Open access journal, EDP Sciences, http://www.swsc-journal.org/.
- Knipp D. Understanding Space Weather and the Physics behind it. — McGraw-Hill, 2011. — 744 p.
- Luette P., Park C. G., Helliwell R. A. Longitudinal variations of very-low-frequency chorus activity in the magnetosphere: Evidence of excitation by electrical power transmission lines // Geophys. Res. Lett. 1977. 4, N 7. P. 275–278.
- Molchanov O. A., Hayakawa M., Rafalsky V. A. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere and magnetosphere // J. Geophys. Res. 1995. 100. P. 1691–1712.
- Moldwin M. An Introduction to Space Weather. New York: Cambridge Univ. Press, 2008. – 156 p.
- Nemec F., Parrot M., Santolik O. Influence of power line harmonic radiation on the VLF wave activity in the upper ionosphere: Is it capable to trigger new emissions? // J. Geophys. Res. – 2010. – 115. – P. A11301. – doi:10.1029/2010JA015718.
- Nemec F., Santolic O., Parrot M., Berthelier J. J. Comparison of magnetospheric line radiation and power line harmonic radiation: A systematic survey using the DEM-ETER spacecraft // J. Geophys. Res. 2007.– 112. P. A04301.
- Nemec F., Santolic O., Parrot M., Bortnik J. Power line harmonic radiation observed by satellite: Properties and propagation through the ionosphere // J. Geophys. Res. – 2008. – 113. – P. A08317.
- Park C. G. VLF wave activity during a magnetic storm: A case study of the role of power line radiation // J. Geo-phys. Res. 1977. 82, N 22. P. 3251–3260.
- Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // Ann. Geophys. – 1990. – 8. – P. 135–145.
- Parrot M., Zaslavski Y. Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere // Surv. Geophys. – 1996. – 17, N 1. – P. 67–100.
- Power line radiation and its coupling to the ionosphere and magnetosphere / Ed. H. Kikuchi. — Reidel, 1983. — 208 p.
- Report of the Assessment Committee for the National Space Weather Program / Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. — MD (USA): Silver Spring, 2006. — 118 p.

- Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2005. 67, N 8–9. P. 821–828.
- Row R. V., Mentzoni M. H. On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return // Radio Sci. - 1972. - 7, N 11. -P. 1061-1066.
- Simões F., Pfaff R., Freudenreich H. Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere // Geophys. Res. Lett. – 2011. – 38. – P. L22101. – doi:10.1029/2011GL049668.
- Space Weather, Its impact on Earth and implication for business / Lloyd's 360 Risk Insight report. — London, Great Britain, 2010. — 36 p.
- Surkov V. V., Nosikova N. S., Plyasov A. A., et al. Penetration of Schumann resonances into the upper ionosphere // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2013. – P. 65–74. – doi: 10.1016/j.jastp.2013.02.015.

Стаття надійшла до редакції 10.10.14

Д. Ф. Дудкин, В. А. Проненко, В. Е. Корепанов, С. И. Климов

ИЗЛУЧЕНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Проведен анализ экспериментально обнаруженного на нескольких спутниках явления излучения гармоник линий электропередач, которое наблюдается в ионосфере. Полученные данные дают основание настаивать на необходимости постоянного спутникового мониторинга ионосферных техногенных возмущений для объективного оценивания и прогноза космической погоды. Предполагается, что развитие мониторинга позволит создать карту электромагнитного загрязнения околоземного пространства в локальном и глобальном масштабах.

D. F. Dudkin, V. O. Pronenko, V. Ye. Korepanov, S. I. Klimov

POWER LINE RADIATION IN THE NEAR-EARTH SPACE

We analyze the ionospheric phenomenon called as the power line harmonic radiation (PLHR) and observed onboard some low-Earth orbiting satellites. The obtained experimental data confirm the necessity of the permanent satellite monitoring of ionospheric technogenic perturbations for the objective estimation and prognosis of space weather. It is supposed that the further development of such a monitoring will allow one to create a map of electromagnetic contamination of near-Earth space both in local and global scales.
УДК 681.785.574

В. Г. Колобродов¹, М. І. Лихоліт², Д. В. Поздняков², В. М. Тягур²

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ ² Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Проаналізовано варіанти побудови зображувальних фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі. Значну увагу приділено аналізу можливих оптичних схем, які можуть бути застосовані при розробці зображувальних фур'є-спектрометрів. Розглянуті схеми можуть бути використані у спектрометрах космічного і авіаційного базування.

ВСТУП

Розвиток сучасної держави не можна уявити без використання космічного простору для вирішення як загальнодержавних, так і комерційних задач. Аналіз напрямків розвитку передових держав світу засвідчує, що впровадження сучасних космічних технологій дозволяє вирішувати комплекс задач зв'язку, навігації, картографування, моніторингу Землі та ін. [6]. Особливого значення набуває створення систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з навколоземного простору. Знімки, отримані з космічних апаратів ДЗЗ, використовуються спеціалістами багатьох галузей для пошуку корисних копалин, оцінювання ґрунтів для сільського господарства, вивчення та оцінювання океанічних ресурсів, виявлення забруднень, аналіз та прогнозування кліматичних змін, картографування рельєфу та інше [3, 4, 14].

Найбільш перспективними є зображувальні фур'є-спектрометри, що створюють так званий «куб даних», який по двох осях має дві просторові координати підстильної поверхні, а по третій — спектральну координату, причому реєстрація по цій координаті провадиться у сотнях спектральних каналів. Такі системи не тільки дають набагато більше інформації, ніж мультиспектральні системи, але ще й мають переваги над класичними (дисперсійними або фільтровими) гіперспектральними системами [2].

ТИПИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ

Зображувальний фур'є-спектрометр (fourier transform imaging spectrometer) ($3\Phi C$) — пасивна спектральна сканувальна оптико-електронна система. Особливістю є те, що $3\Phi C$ реєструє не спектр підстильної поверхні, а інтерференційну картину. Відновлення спектру здійснюється шляхом використання зворотного перетворення Фур'є до сигналу, зареєстрованого матричним приймачем випромінювання. Перевагою $3\Phi C$ у порівнянні з іншими системами (дисперсійними та фільтровими) є те, що реєстрація всіх спектральних каналів (а їх може бути декілька сотень) здійснюється одночасно.

Відомі схеми ЗФС можна розділити на основні два типи, які розрізняються способом одержання різниці ходу між променями [1]:

1) статичні (spatially modulated imaging spectrometer), у яких інтерферограма створюється та реєструється у вигляді нерухомої картини, а формування «куба даних» (з другою просторовою координатою) здійснюється при русі платформи зі спектрометром по орбіті, тобто при скануванні поверхні Землі;

2) динамічні (temporally modulated imaging spectrometer) — у таких приладах різниця ходу променів змінюється механічним способом, наприклад шляхом переміщення одного з дзеркал

[©] В. Г. КОЛОБРОДОВ, М. І. ЛИХОЛІТ, Д. В. ПОЗДНЯКОВ, В. М. ТЯГУР, 2014



Рис. 1. Оптична схема дзеркального (*a*) та монолітного (б) трикутного інтерферометра Саньяка: 1 — вхідна оптика, 2 — вхідна щілина, 3 — світлоділильна пластина; 4, 5 — дзеркало, 6 — монолітний інтерферометр Саньяка (склейка з двох пентапризм, на гіпотенузній грані — світлоділильне покриття), 7 — вихідна оптика, 8 — циліндрична оптика, 9 — матричний приймач випромінювання

інтерферометра, а інтерферограма, що реєструється фотоелектричним способом, є електричним сигналом, залежним від часу.

Окремо можна виділити поляризаційні та комбіновані фур'є-спектрометри.

Розглянемо детальніше оптичні схеми таких систем.

Статичні фур'є-спектрометри. Статичні фур'є-спектрометри зазвичай будують на базі інтерферометра Саньяка. Класичний трикутний інтерферометр Саньяка може бути або дзеркальним, або монолітним (рис. 1). Принцип роботи таких приладів наведено у роботах [5, 10, 11, https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satel-lite-missions/m/MighteSat II.1].

Вхідна оптика будує зображення підстильної поверхні у площині вхідної вузької прямокутної щілини 2. Ширина вхідної щілини дорівнює ширині пікселів на матричному приймачі 9, довжина щілини — висоті стовпців матриці. Розмір вхідної щілини можна змінювати, збільшення ширини щілини призведе до збільшення відношення сигнал/шум, але водночас до зменшення просторового розділення приладу. При великій ширині щілини зображувальний фур'є-спектрометр.

Далі світлоділильна пластина у інтерферометрі розділяє вхідне випромінювання на два пучки, один з яких відбивається, а інший проходить через нього. Ці два пучки дають два зображення підстильної поверхні. Якщо інтерферометр симетричний, два зображення збігаються, і інтерференційних ефектів нема. Але якщо одне з дзеркал (одна з граней призм) зміщене, тоді пучки будуть проходити різний шлях, і два зображення підстильної поверхні будуть змішені перпендикулярно до оптичної осі у різних напрямках. Таким чином, інтерферометр Саньяка вносить поперечний зсув між когерентними пучками, що пройшли крізь нього. Ці два пучки будуть інтерферувати у задній фокальній площині вихідної оптики 7. При цьому передня фокальна площина вихідної оптики 7 збігається із зображенням підстильної поверхні на вхідній щілині 2, тому після вихідної оптики 7 пучки поширюються паралельно оптичній осі. Для того щоб побудувати зображення вхідної щілини 2 у площині матричного приймача випромінювання 9, між вихідною оптикою 7 та матрицею 9 розміщують циліндричну оптику 8, причому матриця 9 знаходиться у її задній фокальній площині.

Вздовж стовпців матриці будується зображення щілини 2, тобто вузької полоси підстильної поверхні, розміщеної перпендикулярно до напрямку зміщення носія. Просторове розділення по цій координаті визначається розміром пікселів у стовпцях матриці. Одночасно з цим вздовж рядків матриці реєструється інтерферограма (функція автокореляції) від кожної ділянки підстильної поверхні, розмір зображення якої відповідає одному пікселу матриці. Наступне відновлення інтерферограми перетворенням Фур'є дає спектральну інформацію для кожної ділянки підстильної поверхні. Друга просторова координата реєструється послідовно у результаті зміщення зображення сцени відносно вхідної щілини при зміщенні носія. Такий прилад схожий на щілинний спектрометр: кожен рядок матриці буде містити спектр однієї ділянки підстильної поверхні у формі інтерферограми.

Перевагою дзеркальної схеми є те, що відстань між максимумами смуг можна довільно змінювати, зміщуючи одне із дзеркал. Підкреслюємо, що для отримання інтерферограми дзеркало не рухається, дзеркало зміщується до досягнення потрібної відстані між смугами, а потім закріплюється. Недоліком є чутливість до вібрацій.

Перевагою монолітної схеми є те, що вона не чутлива до роз'юстувань від вібрацій у процесі роботи, однак вона дорожча за дзеркальну схему та вимагає великої точності при виготовленні призм інтерферометра.

Інтерферометр Саньяка може бути чотирикутним (рис. 2) [7, https://directory.eoportal.org/ web/eoportal/satellite-missions/h/HawaiiSat-1].

Інтерферометр має чотирикутну форму, містить три дзеркала, розташованих під кутом 90° один до одного, та світлоділильну пластину. На відміну від класичного інтерферометра Саньяка, чотирикутна схема має меншу довжину ходу променів, що зменшує віньєтування. Випромінювання, що потрапляє у інтерферометр, розділяється на два пучки світлоділильною пластиною. Пучки проходять різні за довжиною шляхи та фокусуються на приймачі випромінювання. Світлоділильну пластину та одне з дзеркал можна зміщувати за допомогою п'єзодвигунів. Світлоділильна пластина після розвороту на дуже малий кут закріплюється, що створює постійний градієнт різниці ходу вздовж рядків на матричному приймачі випромінювання. Завдяки цьому виникає інтерференційна картина.

У кожному кадрі кожна точка підстильної поверхні зображена на приймачі випромінювання з однією різницею ходу, тому один кадр не несе у собі спектральної інформації. Для отримання інтерферограми з усіма можливими різницями ходу однієї точки на поверхні Землі необхідно сканувати поверхню Землі так, щоб у кожному наступному кадрі точка на приймачі зміщувалася приблизно на один піксель. Ця серія кадрів і буде містити у собі інтерферограму з усіма можливими різницями ходу, а після перетворення фур'є-спектр даної точки.

Динамічні фур'є-спектрометри. Динамічні фур'єспектрометри звичайно будують на базі модифікацій інтерферометра Майкельсона. Даний інтерферометр у класичному вигляді показано на рис. 3.

Інтерферометр Майкельсона складається зі світлоділильної пластини та двох дзеркал, одне



Рис. 2. Оптична схема чотирикутного інтерферометра Саньяка: 1 — світлоділильна пластина, 2 — дзеркало, 3 — вихідна оптика, 4 — матричний приймач випромінювання



Рис. 3. Інтерферометр Майкельсона: *1* — нерухоме дзеркало, *2* — світлоділильна пластина, *3* — рухоме дзеркало, *4* — вихідна оптика, *5* — матричний приймач випромінювання

з яких закріплене, а інше рухається перпендикулярно до оптичної осі інтерферометра та змінює різницю ходу променів. Для створення інтерференційної картини при всіх можливих різницях ходу потрібно спостерігати сцену деякий час, впродовж якого дзеркало пройде з одного крайнього положення в інше. Для нормального функціонування дзеркала повинні бути перпендикулярні до оптичних осей інтерферометра.



Рис. 4. Інтерферометр Майкельсона з кутовими відбивачами: 1 — нерухомий кутовий відбивач, 2 — світлоділильна пластина, 3 — рухомий кутовий відбивач, 4 дзеркало, 5 — вихідна оптика, 6 — матричний приймач



Рис. 5. Модифікований інтерферометр Майкельсона: 1 — вхідна оптика, 2 — шестикутна світлоділильна призма, 3 — компенсаторна пластинка; 4, 7 — нерухоме дзеркало; 5 — нерухома клиновидна призма, 6 — рухома клиновидна призма, 8 — вихідна оптика, 9 — матричний приймач випромінювання

Якщо це не так, виникають похибки у вимірюванні. У цій схемі додатково може застосовуватися лазер, встановлений перед світлоділильною пластиною для точного вимірювання величини зміщення рухомого дзеркала.



Рис. 6. Інтерферометр з подвійним променезаломленням: *1* — поляризатор-1; *2*, *3* — призма Волластон, *4* — поляризатор-2, *5* — вихідна оптика, *6* — матричний приймач



Рис. 7. Комбінація зображувальних фур'є-спектрометрів статичного та динамічного типів: 1 — вхідна оптика, 2 — коліматор, 3 — нерухомі дзеркала, 4 — світлоділильна пластина, 5 — вихідна оптика, 6 — матричний приймач випромінювання

Для покращення роботи приладу замість плоских дзеркал використовуються кутові відбивачі (рис. 4). Кут падіння променів на кутові відбивачі дорівнює куту відбивання від них незалежно від кута розміщення відбивачів, тому при їхньому використанні значно знижуються вимоги до точності встановлення.

Можливо також замінити кутові відбивачі на дифракційні решітки, встановлені під деякими кутами до оптичних осей інтерферометра для підвищення роздільної здатності приладу [8].

У роботі [12] описаний варіант модифікованого інтерферометра Майкельсона з клиновидними призмами. Цей варіант наведено на рис. 5.

Інтерферометр складається з вхідної оптики, світлоділильної призми, двох нерухомих дзеркал та двох клиновидних призм, одна з яких рухається для зміни оптичної різниці ходу. Для компенсації дисперсії, що вноситься призмами у одному каналі, у інший вводиться компенсаторна пластинка. У фокальній площині вихідної оптики створюється інтерференційна картина. Інтерференційну картину та зображення одночасно реєструє матричний приймач випромінювання.

Перевагою такої схеми є менша чутливість до вібрацій та менша точність переміщення клину, ніж у схемах з рухомими дзеркалами.

Поляризаційні фур'є-спектрометри. Поляризаційні фур'є-спектрометри звичайно будують на базі поляризаційних інтерферометрів. Один з варіантів схем такого інтерферометра представлений на рис. 6 [9].

Інтерферометр з подвійним променезаломленням складається з двох призм Волластона, встановлених так, як показано на рис. 6. Випромінювання зі сцени потрапляє на поляризатор 1, що поляризує випромінювання під кутом 45° до оптичних осей призм Волластона. Далі випромінювання, після проходження першої призми Волластона, ділиться на два пучки з однаковою інтенсивністю. Ці два пучки ортогонально поляризовані та розходяться. Після проходження другої призми Волластона два пучки колімуються та фокусуються вихідною оптикою 5 на матричний приймач 6, де спостерігається інтерференційна картина. Для зміни різниці ходу променів друга призма Волластона рухається перпендикулярно до оптичної осі спектрометра.

Такий інтерферометр має всі переваги зображувальних фур'є-спектрометрів, а також він нечутливий до вібрації. Точність встановлення оптичних компонентів у приладі, побудованому за цією схемою, на два порядки нижча, ніж вимагається у приладах, побудованих за традиційними схемами. Спектральний діапазон роботи приладу обмежений лише спектральним пропусканням оптики та спектральною чутливістю матричного приймача.

Комбіновані фур'є-спектрометри. Схему даного фур'є-спектрометра, що є комбінацією спектрометрів статичного та динамічного типів, представлено на рис. 7 [13].

Вхідна оптика будує зображення підстильної поверхні у першу площину зображень. Далі коліматор колімує випромінювання, і воно потрапляє у інтерферометр Саньяка. Вихідна оптика фокусує отриману інтерферограму на матричний приймач випромінювання. За способом отримання різниці ходу ця схема схожа на ЗФС

| Тип спектрометра | Переваги | Недоліки |
|-----------------------|---|--|
| Статичний дзеркальний | Відсутність рухомих частин; відносно дешева та проста у виготовленні конс- трукція інтерферометра; можливість зміни відстані між максимумами у ін- терференційній картині | Чутливість до роз'юстувань, вібрацій; використання циліндричної оптики; на- явність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС |
| Статичний монолітний | Відсутність рухомих частин, нечут- ливість до вібрацій | Відносно дорога та складна у виготовленні конструкція інтерферометра; використання циліндричної оптики; наявність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС |
| Динамічний | Відсутність щілини, що збільшує світ- лосилу у порівнянні зі статичними ЗФС | Наявність рухомих частин; складний алго- ритм обробки отриманих зображень |
| Поляризаційний | Відсутність щілини, що збільшує світ- лосилу у порівнянні зі статичними ЗФС | Наявність рухомих частин, хоча точність їхнього переміщення менша за точність, що потрібна у динамічних ЗФС |
| Комбінований | Відсутність щілини, що збільшує світло- силу у порівнянні зі статичними ЗФС; відсутність рухомих частин та цилінд- ричної оптики | Складний алгоритм обробки отриманих зображень |

Характеристики схем зображувальних фур'є-спектрометрів

статичного типу, однак за способом реєстрації інтерферограми — на ЗФС динамічного типу.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел засвідчує, що на даний час значна увага приділяється ЗФС статичного типу через їхні переваги у порівнянні з ЗФС динамічного типу (відсутність рухомих частин, нечутливість до вібрацій, відносна дешевизна). Основна доля ЗФС, що зараз використовується, побудована на основі інтерферометра Саньяка. Зображувальні фур'є-спектрометри поляризаційного типу використовуються зараз тільки у лабораторних умовах, де досліджуються різні модифікації.

Переваги та недоліки розглянутих схем показані у таблиці.

Подальша робота буде спрямована на дослідження і розробку ЗФС комбінованого типу, як найбільш перспективного [13].

- 1. Артюхина Н. К., Климович Т. В., Котов М. Н. Математическая модель функционирования фурье-видеоспектрометра // Вісник НТУУ «КПІ». — 2012. — Вип. 43. — С. 35—46.
- 2. Горбунов Г. Г. Фурье-спектровизоры // Гиперспектральные приборы и технологии: Тез. докл. научнотехнической конф. Красногорск, 2013. С. 73—74.
- 3. Гриб Д. А., Худов Г. В., Маковейчук О. М., Карлов Д. В. та ін. Використання супутникових даних в інтересах оцінки пожежної обстановки при бойовому застосуванні повітряних сил збройних сил України // Системи озброєння і військова техніка. — 2010. — № 3 (23). — С. 176—179.
- 4. *Жолобак Г. М.* Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України // Космічна наука і технологія. 2010. **6**, № 3. С. 46—54.
- Пат. 2313070 Российская Федерация, МПК G01J3/ 45,G01B9/02. Интерференционный спектрометр [Электронный ресурс] / Грязнов Г. М., Егорова Л. В., Стариченкова В. Д. и др. — Заявл. 26.12.2005; опубл. 20.12.2007. — Режим доступа: http://www.freepatent. ru/patents/2313070
- 6. *Пашков Д. П.* Анализ развития оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли // Системи управління, навігації та зв'язку. 2008 Вип. 4 (8). С. 15—18.
- 7. *Crites S. T., Lucey P. G., Wright R., et al.* A low cost thermal infrared hyperspectral imager for small satellites // Proc. SPIE. 2011. **8044**, Sensors and Systems for Space Applications.

- Ferrec Y. Spectro-imagerie aéroportée par transformation de Fourieravec un interféromètre statique à décalage latéral :réalisation et mise en oeuvre: these pour obtenir le grade deDocteur en Sciences. — Université Paris-Sud XI, 2008. — Mode d'accès: http://pastel.archives-ouvertes.fr/ docs/00/35/71/22/PDF/these_Ferrec.pdf.
- 9. *Harvey A. R., Fletcher-Holmes D. W.* Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer // Opt. Express. 2004. 12, N 22. Mode of access: http://www.optics-infobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-12-22-5368.
- Lucey P. G. SMIFTS: A cryogenically-cooled spatiallymodulated imaging infrared interferometer spectrometer // Proc. SPIE – 1993. – 1937, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment.
- Otten III L. J., Butler E. W., Rafert B., Sellar R. G. Design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft environmental remote sensing // Proc. SPIE. — 1995. — 2480, Imaging Spectrometry.
- Tingkui Mu, Chunmin Zhang, Daochang Zhao. Analysis of a moderate resolution Fourier transform imaging spectrometer // Opt. Communs. – 2009. – 282. – P. 1699– 1705.
- Yan Yuan, Xiubao Zhang, Chengming Sun, Zhiliang Zhou. Modeling of the temporally and spatially modulates Fourier transform imaging spectrometer working in orbit // Optik. — 2011. — 122.— P. 1576—1583.
- Yuen P., Richardson M. An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition // Image Sci. J. – 2010. – P. 1–13.

Стаття надійшла до редакції 06.10.14

В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт, Д. В. Поздняков, В. М. Тягур

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗОБРАЖУВАЛЬНИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Проаналізовано варіанти побудови зображувальних фур'єспектрометрів дистанційного зондування Землі. Значну увагу приділено аналізу можливих оптичних схем, які можуть бути застосовані при розробці зображувальних фур'єспектрометрів. Розглянуті схеми можуть бути використані у спектрометрах космічного і авіаційного базування

V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, D. V. Pozdniakov, V. M. Tiagur

OPTICAL SYSTEMS OF FOURIER TRANSFORM IMAGING SPECTROMETER FOR REMOTE SENSING

We analyzed some variants of Fourier transform imaging spectrometer (FTIS) for remote sensing. Much attention is given to the analysis of possible optical schemes which can be applied in the FTIS design. The considered schemes can be used in devices of space and aviation basing. УДК 528.88+ 504.064+ 303.733

О.В. Томченко

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ВИКОРИСТАННЯ КОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЗЗ ТА НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Обґрунтовується можливість використання методу аналізу ієрархій для оцінки екосистемних послуг Київського водосховища з поєднанням результатів дешифрування матеріалів ДЗЗ та наземних спостережень (гідрофізичних, гідрохімічних, гідробіологічних показників) за період 1988—2013 рр. Подано критеріальну оцінку фізіономічних та аналітичних характеристик водойми і шляхом обчислення їхніх пріоритетів виконано аналіз стану водосховища як для підтримання біотичного різноманіття, так і з позиції використання його для виробничих потреб людини (комунального водопостачання та видобутку гідроелектроенергії).

ВСТУП

Київське водосховище — складна багатофункціональна екосистема, потенціал якої пов'язаний з інтенсивним соціально-економічним розвитком, формуванням багатогалузевих виробничих комплексів, еколого-рекреаційною та природоохоронною діяльністю. Воно виконує низку важливих функцій: сприяє виробництву електроенергії Київськими ГЕС та ГАЕС, забезпечує воднотранспортні вантажні перевезення, використовується для сезонного регулювання стоку Дніпра і Прип'яті, є джерелом санітарно-екологічних попусків на київську ділянку Канівського водосховища та інтенсивно використовується в рекреаційних цілях [8].

Головним конфліктом гармонійного та збалансованого розвитку його території є конфлікт між соціально-економічними потребами людини та збалансованим існуванням екосистеми. Бажано використовувати водойму у поляризованому виді обох напрямків та при цьому намагатися гармонізувати свою життєдіяльність і привести її у відповідність із законами природи [10, 11].

Моніторинг якісного стану водних ресурсів в Україні виконується підрозділами Держводагенства і є інформаційною системою, що здійснює збирання, збереження та оброблення багаторічної наземної інформації про стан та якість вод для комплексної оцінки її подальшого водогосподарського використання. На відміну від системної оцінки якості води для водоспоживання, моніторинг екосистемних послуг (екологічних функцій) водних ресурсів в Україні ніхто не виконує. Саме тому метою нашої роботи було обґрунтування комплексної оцінки екосистемних функцій великої штучної водойми — Київського водосховища — з використанням матеріалів ДЗЗ, які дозволили виділити угрупування вищої водної рослинності, що є середовищем існування інших видів. Саме ці рослинні угрупування і є як показником, так і фактором стану екосистеми.

Методологічною базою досліджень було вибрано метод аналізу ієрархій — математичний інструмент системного підходу для вирішення складних проблем прийняття рішень при стратегічному плануванні.

[©] О. В. ТОМЧЕНКО, 2014

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення ретроспективного аналізу структури заростання водосховища були використані дані дешифрування космічних знімків супутників «Landsat TM» та «Landsat OLI» (рис. 1) за період 1988—2013 рр. (опрацьовано 12 знімків) та картографічні матеріали (топографічні карти та карти глибин). Також нами в 2012—2013 рр. були проведені натурні дослідження сучасних особливостей заростання верхів'я Київського водосховища угрупуваннями вищих водних рослин (в об'ємі, принятому В. М. Катанською [3]) з метою виділення еталонних ділянок для подальшого дешифрування. В ході роботи розроблено процедуру тематичної обробки супутникових даних та наземної інформації, результатом якої є карти природно-територіальних комплексів (ПТК) акваторії водосховища. Так, для класифікації різних типів об'єктів, представлених на знімках «Landsat», застосовувався класифікатор, побудований на штучних нейронних мережах. Розпізнавання виконувалося з використанням моделі нейронної мережі багатошаровий Перцептрон (MLP), у якій вхідними ознаками були дані спектральних каналів, а також значення нормалізованого вегетаційного індексу *NDVI* та водного індексу *NWI*. Як дешифрувальні ознаки

| T (1 | a . | | | | T7 ** | |
|---------------|-------------|---------------------|-------------|----------------|------------|-------------|
| Tahnung I | Стятистичні | ЛАНІ ВУІЛНИХ | ана птичних | узпактепистик | КИІВСЬКОГО | волосуовищя |
| 1 40514451 1. | Claine in m | дани влідних | ana, n m | Aupuntephetink | IMIDCDROLO | водословнщи |

| | | Площі ПТК, га | | Гідробіологічні показники | | | | | |
|----------------------|------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|--|--|
| Роки Г | Пограничні | Водні та | Відкрита | Індекс са | пробності | Індекс Шеннона по чисельності | | | |
| сухопутні біотопи | | водно-болотні біотопи | водна поверхня | по фіто- планктону | по зоо- планктону | по фіто- планктону | по зоо- планктону | | |
| 1988 | 6352.4 | 13483.4 | 28143.9 | | | | ••• | | |
| 1993 | 7115.4 | 16674.8 | 25018.4 | 2.04 | 1.78 | | | | |
| 1998 | 7944.4 | 15178.5 | 25861.6 | 1.99 | 1.93 | 3.54 | 1.98 | | |
| 2003 | 5473.4 | 22471.8 | 20596.5 | 1.97 | 1.80 | 2.52 | 1.62 | | |
| 2008 | 4212.0 | 21988.0 | 20787.1 | 2.02 | 1.56 | 3.33 | 2.49 | | |
| 2013 | 3707.8 | 24365.7 | 18717.2 | 1.91 | 1.66 | 2.71 | 2.16 | | |

| | Гідрофізичні показники | | | | | Гідрохімічні показники | | | | | | |
|------|--------------------------|------------------|---|--|---------------------------|--------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
| Роки | Середній | Об'єм | При- | Ви- | CO | 0 | Cl | Кольо- | Зведені інд | екси та пока | зники яко | ості води |
| | коефіцієнт водообміну | водо- сховища | плив ¹ , млн м ³ | трата ² , млн м ³ | СО ₂ , мг/л | О ₂ , мг/л | О ₂ , СІ, ровість, иг/л мг/л град | ПХЗ-10 (фіз-хім.) ³ | ПХЗ-10 (антр.) ⁴ | $I_{\rm cah}^{5}$ | I6 | |
| 1988 | 8.6 | 3270 | 30400 | 30200 | 1.8 | 8.60 | 29.4 | 22.1 | 5.3 | 3.9 | 2.5 | 4.0 |
| 1993 | 11.4 | 3140 | 40200 | 37500 | 3.4 | 9.87 | 24.8 | 25.5 | 15.6 | 7.5 | 3.2 | 5.0 |
| 1998 | 8.4 | 3040 | 29126 | 27600 | 6.7 | 11.52 | 24.9 | 42.8 | 12.5 | 5.9 | 3.4 | 3.5 |
| 2003 | 7.1 | 3380 | 26300 | 25200 | 9.5 | 8.01 | 24.0 | 37.7 | 19.9 | 4.6 | 3.7 | 2.8 |
| 2008 | 9.2 | 3190 | 32400 | 30600 | 12.6 | 7.82 | 21.3 | 36.1 | 22.2 | 4.6 | 3.5 | 2.6 |
| 2013 | 10.29 | 3190 | 34900 | 34200 | 11.7 | 13.08 | 18.96 | 43 | 19.4 | 3.8 | 3.4 | 2.8 |

П р и м і т к а . 1. Приплив — поверхневий приплив, виміряний на річках Дніпро, Прип'ять разом з опадами. 2. Витрата — поверхневий стік крізь Київський гідровузол (турбіни ГЕС) разом з опадами. 3. ПХЗ-10 (фіз-хім.) — показник хімічного забруднення води за фізико-хімічними властивостями. 4. ПХЗ-10 (антр.) — показник хімічного забруднення води за речовинами органічного походження та біогенними компонентами. 5. I_{cah} — еколого-санітарний індекс. 6. I_{rosc} — індекс показників токсичної дії.



Рис. 1. Динаміка заростання верхів'я Київського водосховища на КЗ «Landsat»: *a* — станом на 06.06.1988 р., *б* — станом 13.08.2013 р.

використовувалися спектральні яскравості поверхонь виділених класів.

Також для розв'язання поставленої задачі було вивчено широкий набір наземних гідрофізичних, гідрохімічних, гідробіологічних показників, наданих Центральною геофізичною обсерваторією МНС України, які відображають особливості абіотичних і біотичних компонентів водної екосистеми. Цей набір включає значення вмісту біогенних і органічних речовин, компонентів сольового складу, прозорості, розчиненого кисню, специфічних речовин токсичної та радіоактивної дії та інших інгредієнтів, а також температури води і загального водообміну (табл. 1). На основі цих показників встановлено залежність між розвитком рослинних угрупувань та характером факторів, що впливають на їхнє існування у природних комплексах водосховища [4].

Оцінка ресурсу екосистемних послуг — це складний процес поетапного вибору пріоритетів (чому надати перевагу — водогосподарському використанню чи підтриманню належної якості екосистеми) для здійснення якого найбільше підходить метод аналізу ієрархій (Analytic Hier-

archy Process), побудований Т. Сааті (США) на основі лінгвістичного підходу та експертної інформації [6]. Цей метод дозволяє шляхом відносного зіставлення багатьох параметрів і попарних експертних порівнянь ступеня переваги по кожному з них виявити найважливіші складові проблеми, найкращі способи перевірки тверджень та оцінки елементів.

Цей підхід дозволяє сформулювати задачу оцінки екосистемних функцій Київського водосховища за період спостережень з 1988—2013 рр. як систему ієрархічно пов'язаних чинників, критеріїв і впливів, що відбивають особливості реакцій рослинних комплексів мілководних біотопів на зміну зовнішніх умов.

Метою методу аналізу ієрархій (MAI) є розв'язання задачі оцінювання за допомогою її багатокритеріального рейтингування. Метод дозволяє «зважити» у єдиній шкалі переваги і недоліки розглянутих альтернатив і одержати по кожній з них формалізовану підсумкову оцінку, на основі експертних оцінок сформувати необхідну цільову функцію і вибрати з багатьох альтернативних варіантів найвигідніший для рішення поставленої задачі [1].



Рис. 2. Етапи МАІ

Основна проблема використання методу полягає у послідовній декомпозиції цільової функції на простіші критеріальні складові — показники, що об'єднуються у відповідні ієрархічні рівні. Найбільш відповідальним етапом є побудова ієрархії суджень між першим і останнім рівнями. Метод поділяється на декілька етапів (рис. 2).

Коли розглянуту проблему представлено ієрархічно, для формалізації експертної процедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і по кожній складовій даного ієрархічного рівня. Провадиться їхня нормалізація і оцінка векторів пріоритетів з точки зору ступеня їхнього впливу на складові попереднього рівня [12].

Елементи матриці — відношення абсолютних пріоритетів експертів — є оцінками, судженнями експерта (чи їхніми групами) про відносну важливість окремих параметрів, що порівнюються по відношенню до параметра вищого рівня, із заданою попередньо шкалою оцінок. Для зручності представлення подальших міркувань матриці попарних порівнянь, що завжди є квадратними і обернено симетричними, запишемо у вигляді

де i, j = 1, ..., n — число параметрів, порівнюваних на кожному рівні.

Далі обчислюються компоненти власного вектора матриці, а саме:

$$a_{1} = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{1j}\right)^{1/n}, \dots, a_{n} = \left(\prod_{j=1}^{n} a_{nj}\right)^{1/n}.$$
 (2)

З отриманих груп матриць визначаються нормальні оцінки вектора локальних пріоритетів:

$$K_1 = a_1 / \sum_i a_i, \dots, K_n = a_n / \sum_i a_i.$$
 (3)

Після того як компоненти власного вектора отримані для всіх *n* рядків матриці відповідно до виразів (2), стає можливим їхнє використання для подальших обчислень.

Обробка матриць, наприклад, чотирьох рівнянь дає можливість обчислити вектори K^1 , K^2 , K^3 і K^4 пріоритетів відповідних рівнянь, компоненти яких визначають їхні пріоритети з точки зору експерта. Метод аналізу ієрархій дозволяє сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. В узагальненому критерії *F* перший рівень відповідає прийняттю рішення по всім векторам цільових пріоритетів, другий — вектору цільових пріоритетів, третій компонентам вектора цільових пріоритетів і чет-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

вертий — компонентам вектора пріоритетності показників порівнюваних альтернатив [13].

Якщо отримані всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для порівнюваних варіантів має вигляд

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s, \qquad (4)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету K позначає рівень ієрархії; x_p^s — коефіцієнт переваги варіанта *s* за показником *p*.

Значення F дозволяє встановити перевагу того чи іншого альтернативного варіанта системи по всій сукупності аналізованих факторів. Детально про методологію розрахунків описано у роботі [5].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для порівняння ступеня важливості екосистемних послуг верхів'я Київського водосховища як цінного водно-болотного угіддя (ВБУ), з одного боку, та переваг і недоліків наявності Київського водосховища як техногенного комплексу для забезпечення потреб ГЕС, з іншого боку, розроблено інтегральну ієрархічну модель стану водойми, яку розглянемо далі більш детально.

Структурування проблеми і представлення її у вигляді ієрархій. Оскільки результатом дослідження має бути порівняння екологічного стану водосховища за роки спостережень, на верхньо-



Рис. 3. Ієрархічне представлення задачі оцінки екосистемних послуг Київського водосховища за період з 1988—2013 рр.

му (нульовому рівні) ієрархії (див. рис. 3) поставлено мету дослідження — «Оцінка екологічних функцій екосистеми Київського водосховища», на *першому рівні* — три екосистемні функції (послуги) водойми, що чутливо реагують на зміну абіотичних та антропогенних впливів, у першому блоці згруповані підтримувальна та ресурсна функція екосистеми, що включає в себе підтримання екологічної рівноваги найважливіших екологічних процесів та біотичного різноманіття та забезпечення біологічних та рекреаційних ресурсів [7]. Другий та третій блок відображає дві найбільш потужні виробничі функції водосховища, а саме використання його для потреб водопостачання (комунального господарства, промисловості, сільського господарства, зрошення й обводнювання) та видобутку гідроенергетики. На другому рівні використано джерела інформації, а саме засоби дистанційного зондування Землі та наземні спостереження. Третій рівень фізіономічні та аналітичні характеристики, що об'єднують складові та показники, які впливають на стан водойми, а саме — гідрофізичні, гідрохімічні, гідробіологічні показники та отримані на основі дешифрування космічних знімків динаміки змін рослинності гідро- та гігротопів (водних та водно-болотних біотопів), мезотопів (пограничних сухопутних біотопів) та водної по-

| иолиця 2. Шкала парних портвилив 1. Caal | Таблиця 2 | 2. Шкала | парних | порівнянь | T. | Сааті |
|--|-----------|----------|--------|-----------|----|-------|
|--|-----------|----------|--------|-----------|----|-------|

| Відносна важливість (бали) | Ступінь переваги одного об'єкта у порівнянні з іншим |
|---|---|
| 1, 2 3, 4 | Однакова важливість, рівна пріоритетність Один елемент трохи важливіший за інший (слабка перевага) |
| 5,6 | Один елемент суттєво важливіший за ін- ший (сильна перевага) |
| 7,8 | Один елемент значно важливіший за інший (дуже сильна перевага) |
| 9, 10 | Абсолютна перевага одного над іншим |
| Обернені величини чисел, на- ведених вище | Якщо при порівнянні першого елемента з другим отримане значення балу 1—9, то при порівнянні другого елемента з першим матимемо обернену величину (1—1/9) |

верхні. Четвертий рівень — множина найбільш репрезентативних показників середовища водосховища по роках. Пріоритетність всіх блоків стосовно попереднього рівня визначалася експертом.

Експертне попарне порівняння елементів рівнів ісрархічної моделі. Метою побудови множини матриць є кількісне визначення коефіцієнтів відносної пріоритетності показників, які утворюють ієрархію. У відповідності зі специфікою методу необхідно, щоб всі елементи нижнього рівня ієрархії були порівняні експертом попарно стосовно кожного елемента верхнього рівня аж до вершини ієрархії. Так, згідно із рис. 3 кожний із трьох напрямків впливу змін водойми: підтримувальна та ресурсна функція екосистеми та дві виробничі функції, а саме водопостачання та гідроенергетика (рівень 1) характеризується своєю питомою вагою (коефіцієнтом важливості) з точки зору його значущості для «Оцінки екологічних функцій екосистеми Київського водосховища» (рівень 0). Для розрахунку цих коефіцієнтів на нульовому рівні ієрархії будується матриця переваг 3-го порядку. Таким чином всі вхідні статистичні дані переводяться експертом у бали. Ряд вхідних показників наведено у табл. 1.

До клітин матриці записуються результати попарних порівнянь критеріїв у залежності від їхньої значущості стосовно цілі — «Оцінки екологічних функцій екосистеми Київського водосховища». Попарні порівняння проводяться в термінах домінування одних елементів над іншими. Якщо порівнюються якісні фактори, то порівняння проводиться експертно з використанням шкали «відносної важливості» (шкали переваг) згідно із табл. 2. Таким чином опрацьовується кожен елемент ієрархії з 1-го по 4-й рівні включно. При цьому вхідні статистичні наземні показники та отримані по КЗ площі ПТК (табл. 1) мають різне значення для екосистемних послуг водосховища.

Так, всі елементи ієрархії були паралельно порівняні експертом попарно стосовно трьох напрямків екосистемних послуг водосховища (підтримування екологічної рівноваги, потреб водопостачання та гідроенергетики) та були оцінені у відповідні бальні значення в залежності від рівня впливу на кожну функцію екосистеми. Наприклад, збільшення площ водних та водноболотних біотопів, з одного боку, призводить до негативних наслідків для виробничих послуг екосистеми (уповільнення течії та зменшення обсягів води несприятливе для потреб гідроенергетики), з іншого боку, воно сприяє відновленню природніх ВБУ як ядер біорізноманіття рослинних та тваринних організмів.

Математична обробка експертних оцінок. Розрахунок локальних пріоритетів елементів ієрархії. На цьому етапі для кожної з матриць попарних порівнянь розраховуються компоненти власного вектора матриці (2) і провадиться їхнє нормування до одиниці (3). Таким чином визначається вектор локальних пріоритетів критеріальних складових кожного рівня ієрархії. Визначення локальних пріоритетів дозволяє ранжувати (лінійно упорядкувати) складові за ступенем їхньої відносної значущості на кожному рівні ієрархії стосовно елемента верхнього рівня [9]. У табл. 3 наведено отриману в ході розрахунків матрицю значень попарних порівнянь елементів четвертого рівня стосовно динаміки відкритої водної поверхні.

Перевірка узгодженості оцінок для порівнюваних елементів. Відносна узгодженість для системи в цілому характеризує зважене середнє значення відносної узгодженості по всіх матрицях порівнянь. При цьому узгодженість всієї ієрархії складає 0.043771, тобто 4.4 %, що менше, ніж значення 10 %, допустиме за теорією МАІ.

Наприклад, для матриці четвертого рівня індекс узгодженості дорівнює

$$IY = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{6.1571 - 6}{5} = 0.0314 ,$$

відношення узгодженості (ВУ) дорівнює 3.5 %.

Розрахунок елобальних пріоритетів елементів ієрархії. Після того як компоненти власного вектора отримано для всіх n рядків матриці, за формулою (3) визначається вектор локальних пріоритетів критеріальних складових кожного рівня ієрархії. Далі у відповідності зі значеннями векторів локальних пріоритетів (вагами) K^1 , K^2 , K^3 і K^4 визначаються значення згортки узагальненого критерію для порівнюваних років (4). Для прикладу приведемо вираз розрахунку F оцінки екологічного стану Київського водосховища для потреб гідроенергетики за 1988 рік:

$$F_{\rm r} = x_{3/1}^2 (0.3570x_{1/1}^4 + 0.27506x_{2/1}^4 + 0.38062x_{3/1}^4) + x_{3/2}^2 (0.29035x_{6/1}^4 + 0.3149x_{5/1}^4 + 0.075065x_{4/1}^4),$$

де *x_p* — значення (або коефіцієнт переваги) показника середовища *p* для порівнюваних років.

Зіставлення значень згортки узагальненого критерію Fдля порівнюваних років дозволяє оцінити екологічний стан Київського водосховища за всією сукупністю складових, що визначають ієрархію для трьох екосистемних функцій (див. табл. 4). При цьому використані в обчисленнях вхідні наземні та дистанційні дані були однакові, а отримані на основі їхніх експертних попарних порівнянь значення відносної важливості були розраховані експертами окремо, в залежності від оцінки їхнього впливу на кожну з трьох екосистемних функцій.

| Роки | 1988 | 1993 | 1998 | 2003 | 2008 | 2013 | $\prod_{j=1}^n \alpha_{1j}$ | <i>a</i> _i | $K_i \ (X^4_{3/1-6})$ | λ_{max} |
|-------|--------|--------|--------|---------|------|------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| 1988 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 720 | 2.9938 | 0.3806 | 0.9325 |
| 1993 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 60 | 1.9786 | 0.2516 | 1.0775 |
| 1998 | 0.3333 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 1.2599 | 0.1602 | 1.1346 |
| 2003 | 0.25 | 0.3333 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 0.25 | 0.7937 | 0.1009 | 1.0932 |
| 2008 | 0.2 | 0.25 | 0.3333 | 0.5 | 1 | 2 | 0.0167 | 0.5054 | 0.0643 | 0.9960 |
| 2013 | 0.1667 | 0.2 | 0.25 | 0.3333 | 0.5 | 1 | 0.0014 | 0.3340 | 0.0425 | 0.8918 |
| Разом | 2.45 | 4.2833 | 7.0833 | 10.8333 | 15.5 | 21 | | 7.8655 | 1 | 6.1256 |

Таблиця 3. Матриця попарних порівнянь четвертого рівня стосовно динаміки відкритої водної поверхні

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5



Рис. 4. Динаміка екосистемних функцій Київського водосховища за період 1988—2013 рр.

Таблиця 4. Значення узагальненого критерію F_6 , $F_{\rm p}$, $F_{\rm r}$ (біорізноманіття, водопостачання, гідроенергетика) для порівнюваних років (відносна шкала експертних оцінок екологічного стану водосховища)

| Роки | F_{6} | $F_{_{\rm B}}$ | $F_{\rm r}$ |
|------|---------|----------------|-------------|
| 1988 | 0.0897 | 0.2254 | 0.3265 |
| 1993 | 0.0875 | 0.1800 | 0.2341 |
| 1998 | 0.1050 | 0.1449 | 0.1656 |
| 2003 | 0.1456 | 0.1175 | 0.1184 |
| 2008 | 0.2238 | 0.0969 | 0.0874 |
| 2013 | 0.3484 | 0.0814 | 0.0681 |
| | | | |

Отримані результати свідчать про те, що за гідрофізичними та гідрохімічними показниками загальний стан водосховища дещо погіршується для соціально-економічних потреб людини. Так, уповільнення водообміну може вплинути на якість води у водосховищі та його рибні ресурси, як і зміна фізико-хімічних характеристик води, котру ми спостерігаємо. При цьому посилення заростання акваторій водосховища вищою водною рослинністю, що має певні негативні наслідки для господарських функцій водойми, можна розглядати як передумову відновлення біотичного різноманіття водойми та забезпечення екологічної рівноваги. Таким чином, водоймище, техногенне за своїм походженням, з плином часу все більше набуває рис природної водойми [2] з унікальними водно-болотними угіддями,

цінними для відтворення біорізноманіття та збереження місць перебування тварин.

Наочно динаміку екологічних функцій водосховища за період 1988—2013 рр. представлено на рис. 4.

висновки

З використанням методу аналізу ієрархій обгрунтовано методику експертних оцінок для моделювання та визначення екологічних функцій екосистеми штучної водойми на прикладі Київського водосховища, яке, з одного боку, наближається до природних гідроекосистем, з іншого — зазнає інтенсивного впливу у зв'язку з комплексним використанням.

Поєднання використання даних наземного екологічного моніторингу та космічної інформації ДЗЗ, подальший їхній аналіз та математичне моделювання змін певних екологічних функцій гідроекосистеми під впливом антропогенного навантаження дозволило чітко оцінити сучасний екологічний стан водойм та спрогнозувати можливі трансформації. З'ясовано, що процеси, які відбуваються у водосховищі, мають різнонаправлене значення для виробничих та підтримувальних біорізноманіття функцій екосистеми. Так, процеси заростання водосховища вищою водною рослинністю призводять до збільшення ландшафтної різноманітності середовища та, одночасно, до змін у деякого погіршення фізикохімічних показників якості води. У подальшому, з врахуванням отриманого досвіду, доцільно вирішити, що є прибутковішим, тимчасове використання виробничих екопослуг, чи отримання сумарного ефекту від усіх функцій екосистеми та забезпечення оздоровлення всього русла Дніпра на майбутнє.

- 1. Батьковский А. М., Коробов С. П., Хрусталев Е. Ю. Об одном подходе к оценке вариантов реструктуризации оборонно-промышленного комплекса // Экономика и математические методы. — 2004. — 40, № 1. — С. 50—68.
- Водно-болотні угіддя Дніпровського екологічного коридору. — Київ: НАН України, ІНЕКО, 2010. — 142 с.
- Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. — Л.: Наука, 1981. — 185 с.

- 4. *Методи* гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В. Д. Романенка. К.: ЛОГОС, 2006. 408 с.
- 5. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
- Саати Т. Л., Керис К. П. Аналитическое планирование. Организация сис-тем / Пер. с англ. под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1991. — 244 с.
- Соловій І. П., Кулешник Т. Я. Трактування ключових термінів концепції послуг екосистем з огляду на еколого-економічні дослідження ландшафтів // Наук. праці Лісівничої академії наук України: зб. наук. праць. — 2011. — Вип. 9. — С. 174—178.
- Тімченко В. М., Линник П. М., Холодько О. П. та ін. Абіотичні компоненти екосистеми Київського водосховища. — Київ: Логос, 2013. — 60 с.
- 9. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Боднар Е. Н., Козлов З. В. Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // Космічна наука і технология. — 2005. — 11, № 3/4. — С. 75— 60.
- Daily G. C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. — Washington: IslandPress, 1997. — P. 1—10 p. [Electronic resource]. — Mode of access: http://gcpolcc.org/group/ecosystem-services-team/page/esresources
- Groot R. S. Functions of nature: Evaluation of nature in environmental planning, management and decision making. — Groningen: Wolters-Noordhoff BV, 1992. — 315 p.
- Saaty T. L. An eingenvalue allocation model for prioritization and planning // Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania, 1972.
- Saaty T. L. Multicriteria decision making. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. — University of Pittsburgh, RWS Publications, 1990.

Стаття надійшла до редакції 28.05.14

О. В. Томченко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА БАЗЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЗЗ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Обосновывается возможность использования метода анализа иерархий для оценки экосистемных услуг Киевского водохранилища с сочетанием результатов дешифрирования материалов ДЗЗ и наземных наблюдений (гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических показателей) за период 1988—2013 гг. Дана критериальная оценка физиономических и аналитических характеристик водоема и путем вычисления их приоритетов выполнен анализ состояния водохранилища как для поддержания биотического разнообразия, так и с позиции использования его для производственных нужд человека (коммунального водоснабжения и производства гидроэлектроэнергии).

O. V. Tomchenko

USING REMOTE SENSING IMAGERY AND GROUND-BASED OBSERVATIONS FOR INTEGRATED ASSESSMENT OF THE KYIV RESERVOIR'S ECOSYSTEM SERVICES ON THE BASIS OF ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

We substantiate the possibility of using analytic hierarchy process to assess the ecosystem services of the Kyiv reservoir for the period from 1988 to 2013, combined with interpreted remote sensing imagery and ground-based observations (hydrophysical, hydrochemical, and hydrobiological parameters). A criterial evaluation of the reservoir's physiognomic and analytical characteristics is given and the reservoir's state is analyzed through the calculation of their priorities from the positions of maintaining biological diversity and using it for human needs (municipal water supply and hydropower production).

УДК 528.8:004

В. В. Гнатушенко¹, О. О. Кавац², О. Л. Макаров³, Д. П. Бражнік¹

¹Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

² Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

³ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СКАНЕРНИХ ДАНИХ АЕРОКОСМІЧНОЇ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ ЗЙОМКИ

Досліджуються методи злиття, які дозволяють найбільш ефективно підвищити інформативність багатоспектральних аерокосмічних зображень надвисокого просторового розрізнення з мінімальними спотвореннями кольору. Отримані результати свідчать про те, що синергетична обробка сканерних багатоспектральних даних за допомогою запропонованої інформаційної технології на основі ICA- та вейвлет-перетворень у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. Синтезоване зображення має підвищену інформативність без спотворень кольору.

вступ

Знімки сучасних систем дистанційного зондування Землі дозволяють вирішувати різноманітні задачі, а саме: провадити оперативний моніторинг земельних ресурсів, забудов міст, моніторити стан навколишнього середовища і вплив техногенних факторів, виявляти забруднені території, несанкціоновані забудови, оцінювати стан лісових насаджень тощо. При вирішенні цих задач для підвищення інформативності первинних даних класично використовуються методи злиття (pansharpening, fusion) зображень різних спектральних каналів [10, 11]. Для отримання синтезованого зображення з найкращими показниками інформативності необхідно вибрати найбільш ефективний метод злиття, оскільки від цього залежить вирішення поставленої тематичної задачі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На даний час відомо багато різних методів об'єднання фотограмметричних зображень, що дозволяють підвищити інформативність багатоспектральних знімків [3—10, див. також http:// scialert.net/abstract/?doi=rjit.2011.12.23]. При використанні процедури злиття зображень просторове розрізнення мультиспектрального зображення підвищується, як правило, в результаті послідовного виконання таких основних етапів.

1. Перетворення мультиспектрального зображення низького просторового розрізнення з базису RGB (червоний — зелений — синій) у будь-який трикоординатний базис, в якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості.

2. Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного знімка і подальша інтерполяція (лінійна, бікубічна, за правилом найближчого сусіда і т. д.).

3. Заміна яскравісної складової перетвореного зображення панхроматичним зображенням високого просторового розрізнення.

4. Зворотне перетворення в базис RGB.

Якість роботи методу злиття визначається за двома компонентами, а саме підвищення просторової розрізненості та наявність (відсутність) колірних спотворень. У численних дослідженнях, присвячених попередній обробці багатотонових цифрових зображень, основну увагу приділено покращенню їхньої візуальної якості без урахування фізичних механізмів фіксації видової інформації, зокрема міжканальної кореляції, що унеможливлює визначення інфор-

[©] В. В. ГНАТУШЕНКО, О. О. КАВАЦ, О. Л. МАКАРОВ, Д. П. БРАЖНІК, 2014

мативності зображень з позицій аналізу та інтерпретації (метод Брові). Інші дослідження присвячені розв'язанню даної проблеми на основі обчислення статистичних параметрів цифрових зображень (метод головних складових (РСА)), визначення яких утруднено на великих розмірностях первинних даних. Певні дослідження основані на переході до колірно-різницевих метрик комп'ютерної графіки (колірно-метричні методи), в яких вирішується питання про декореляцію первинних видових даних, однак у таких методах вдається врахувати внесок лише спектральних складових первинних багатотональних зображень. Одними з найбільш сучасних методів є різновиди дискретного вейвлет-перетворення (DWT) [8, 9]. Але всі класичні методи, зокрема Грама — Шмідта, Брові, РСА, аналіз незалежних компонент (ICA) та IHS-алгоритм, не враховують особливостей побудови сучасних сканувальних пристроїв, відповідних структур і форматів даних сканувальних систем [3-6]. Окреме застосування зазначених підходів тією чи іншою мірою призводить до спотворення кольорів первинних зображень. Причиною таких спотворень є той факт, що відомі алгоритми головним чином розроблялися для об'єднання зображень супутника SPOT. На відміну від відповідних характеристик зазначеного космічного апарата довжина панхром-хвилі сучасних супутників (IKONOS, «QuickBird», «WorldView-2» та ін.) була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного

діапазону. Крім того, сучасні сканерні системи досконаліші та мають більше, ніж чотири канали (наприклад, «WorldView-2» має вісім каналів).

Тому виникає необхідність у новій технології підвищення просторової розрізненості супутникових зображень з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації та у проведенні подальшого дослідження ефективності злиття з отриманням кількісних оцінок (критеріїв) інформативності (якості) синтезованих зображень.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У роботі [1] запропоновано нову інформаційну технологію підвищення просторового розрізнення цифрових аерокосмічних зображень на основі ІСА- та вейвлет-перетворень, яка дозволяє суттєво підвищити інформативність первинних даних та не призводить до колірних спотворень. Послідовність процедури така. Після перетворення ІСА перша складова мультиспектрального зображення замінюється панхроматичним зображенням. Наступним етапом є зворотне перетворення ІСА та перетворення отриманого зображення у колірну модель HSV (позначимо HSV_{мор}). Далі вихідне мультиспектральне зображення переводиться у колірний простір HSV (позначимо HSV_{MUI}). Яскравісна складова V зображення HSV_{MUL} замінюється яскравісною складовою зображення HSV_{мор}, а результат перетворюється з колірної моделі HSV до колірної моделі RGB. Останнім кроком алгоритму є злит-



Рис. 1. Класифікація методів злиття багатоканальних зображень

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

тя отриманого зображення Mul_{ICA} з PAN за допомогою вейвлетів та отримання вихідного зображення. Одним із вагомих результатів авторів є визначення базових вейвлетів та рівня декомпозиції [2]. Визначено, що найкращий результат злиття панхроматичного та мультиспектрального зображення дає вейвлет Добеші 20-го рівня декомпозиції [2]. Для порівняльного аналізу розробленої технології з класичними методами злиття багатоканальних зображень спочатку розглянемо класифікацію відомих підходів (рис. 1). Усі методи можна поділити на:

• методи на основі трансформації базису;

• методи адаптивного та мультиплікативного злиття;

• методи злиття на основі вейвлет-перетворення;

• методи злиття на основі внутрішньосмугових зв'язків.

Дослідження впливу методів злиття відбувалися на первинних сканерних знімках, отриманих супутником надвисокого просторового розрізнення

| Tr | 1 | 2 | | 1 10 11 | | |
|--------------|----|----------|-----|-------------|---------------------|---------|
| | Ι. | Значення | IHO | формациинов | та сигнальної | ентропц |
| 1 4000000000 | • | | | Population | i a cini mavibilo i | emponni |

| Зображення | Позначення | Ε | Есиг |
|---|------------------|-------|-------|
| Панхроматичне зоб- раження | PAN | 7.103 | 7.541 |
| Первинне мульти- спектральне зобра- ження | MUL | 7.007 | 7.195 |
| Тестове мультиспектральне зображення | TEST | 7.246 | 7.526 |
| PCA | PCA | 7.077 | 7.119 |
| ICA | ICA | 7.004 | 7.195 |
| HSV | HSV | 6.897 | 6.909 |
| Брові | CN BROVEY | 6.057 | 6.685 |
| Грама — Шмідта | GRAM- Schmidt | 7.053 | 7.067 |
| Лінійна IHS | IHS LINEAR | 7.145 | 7.561 |
| Нелінійна IHS-мо- дель | IHS Nonlinear | 7.249 | 7.795 |
| Вейвлет Хаара | HAAR | 7.151 | 7.484 |
| Вейвлет Добеші | DAUBECHIES | 7.177 | 7.558 |
| Вейвлет Р. Койфмана | COIFLET | 7.171 | 7.543 |
| Симплет | SYMPLET | 7.173 | 7.547 |
| Запропонована техно- логія | Proposed | 7.314 | 7.381 |

«WorldView-2». Фрагменти панхромного та мультиспектрального знімків подано на рис. 2 (фрагменти 1, 2). Після злиття зображень за розглянутими вище методами були отримані зображення, які навіть візуально у порівнянні з первинним мультиспектральним зображенням відрізняються більшою чіткістю, але мають суттєві колірні спотворення (рис. 2, 3-13). Синтезоване зображення за новою інформаційною технологією на основі ICA- та вейвлет-перетворень наведено на рис. 2, 14.

З метою визначення впливу кожного методу на якість мультиспектрального зображення у роботі отримано кількісні оцінки інформативності первинного та синтезованих мультиспектральних зображень за усіма методами злиття та новою розробленою технологією на основі ІСА-вейвлет-перетворень, а саме: інформаційна та сигнальна ентропія, *SSIM, PSNR* та інші. Методи декореляції просторових розподілів яскравості основані на обчисленні статистичних параметрів цифрових зображень, які важко визначити при великих обсягах первинних даних. Також у рамках таких методів враховується лише внесок спектральної інформації, що міститься у первинних мультиспектральних зображеннях.

Візуальну якість зображення можна оцінити за критеріями максимуму характеристик інформативності, до яких належить інформаційна ентропія:

$$E(x) = -\sum_{k=0}^{N-1} p_k \cdot \log_2 p_k, \qquad (1)$$

| Зображення /Канал | R | G | В |
|-------------------|--------|--------|--------|
| MUL | 33.276 | 33.275 | 33.275 |
| PCA | 33.223 | 33.616 | 33.692 |
| ICA | 33.223 | 33.616 | 33.691 |
| HSV | 33.275 | 33.254 | 33.290 |
| CN BROVEY | 33.011 | 33.375 | 33.442 |
| GRAM-SCHMIDT | 33.186 | 33.350 | 33.442 |
| IHS LINEAR | 33.177 | 33.604 | 33.703 |
| IHS NONLINEAR | 32.969 | 33.017 | 33.343 |
| HAAR | 33.918 | 34.374 | 34.425 |
| DAUBECHIES | 33.911 | 34.380 | 34.452 |
| COIFLET | 33.918 | 34.389 | 34.459 |
| SYMPLET | 33.904 | 34.371 | 34.443 |
| Proposed | 33.313 | 32.965 | 33.280 |

де N — кількість рівнів яскравості, p_k — частота k-го рівня яскравості вибірки x, k = 0, 1, ..., 255 — рівень яскравості, $\sum p_k = 1$.

Сигнальна ентропія визначається виразом

$$E_{\rm CMT}(x) = -\sum_{i=0}^{N-1} p_i \cdot \log_2 p_i, \qquad (2)$$

де N — кількість рівнів яскравості, $p_i = ix_i / \sum_{J=0}^{253} J \cdot x_J$ — аналог частоти, частота *i*-го рівня яскравості вибірки x, i = 0, 1, ..., 255 — рівень яскравості, $\sum p_i = 1$.

У табл. 1 наведено значення інформаційної та сигнальної ентропій E та $E_{\rm сиг}$, отримані для первинних мультиспектрального та панхроматичного зображень, а також для синтезованих зображень за усіма вказаними методами (розмір зображень 4604 × 4600 пкл).

Важливими характеристиками оцінки якості зображення є також *PSNR*, кореляція та індекс структурної схожості. У виразах (3)—(9) наведено математичні вирази для їхнього обчислення.

Найчастіше використовується пікове відношення сигнал-шум (*PSNR*), яке означає співвідношення між максимумом можливого значення сигналу і потужністю шуму, що спотворює значення сигналу:

$$PSNR = 20 \lg \left[L^2 \left/ \left(\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} (I_r(x,y) - I_f(x,y))^2 \right) \right], (3)$$

де *L* — кількість рівнів яскравості зображення.

| Зображення /Канал | R | G | В |
|-------------------|-------|-------|-------|
| MUL | 0.959 | 0.959 | 0.959 |
| PCA | 0.955 | 0.961 | 0.958 |
| ICA | 0.955 | 0.961 | 0.958 |
| HSV | 0.959 | 0.958 | 0.955 |
| CN BROVEY | 0.946 | 0.954 | 0.949 |
| GRAM-SCHMIDT | 0.958 | 0.960 | 0.958 |
| IHS LINEAR | 0.939 | 0.951 | 0.948 |
| IHS NONLINEAR | 0.932 | 0.935 | 0.935 |
| HAAR | 0.967 | 0.972 | 0.970 |
| DAUBECHIES | 0.967 | 0.972 | 0.971 |
| COIFLET | 0.967 | 0.972 | 0.971 |
| SYMPLET | 0.967 | 0.972 | 0.970 |
| Proposed | 0.962 | 0.955 | 0.956 |

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

У табл. 2 наведено значення *PSNR* для кожного із методів злиття за трьома каналами.

Найкращим значенням кореляції у нашому випадку є найменше при мінімальному зв'язку між компонентами. Кореляція між двома зображеннями описується виразом

$$CORR = \frac{2P_{xy}}{P+P}, \qquad (4)$$

де

$$P_{xy} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} p_1(i,j) p_2(i,j) , P_x = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} p_x(i,j)^2 ,$$

 $x, y = 1, 2, 3; p_x - x$ -складова кольору.

У табл. 3 наведено значення *CORR* для кожного із методів злиття за трьома каналами.

Значення міри структурної схожості *SSIM* обчислюється з виразів [12]:

$$SSIM = \left(\frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}\right) \left(\frac{2\overline{X}\overline{Y}}{(\overline{X})^2 + (\overline{Y})^2}\right) \left(\frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}\right), \quad (5)$$

$$\overline{X} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} x_{ij} , \ \overline{Y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} y_{ij} , \qquad (6)$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})^2, \qquad (7)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \overline{Y})^2, \qquad (8)$$

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (x_{ij} - \overline{X})(y_{ij} - \overline{Y}), \quad (9)$$

| Таблиця 4. | Значення | SSIM |
|------------|----------|-------------|
|------------|----------|-------------|

| Зображення / Канал | R | G | В |
|--------------------|-------|-------|-------|
| MUL | 0.555 | 0.555 | 0.555 |
| PCA | 0.452 | 0.483 | 0.463 |
| ICA | 0.452 | 0.483 | 0.463 |
| HSV | 0.555 | 0.576 | 0.568 |
| CN BROVEY | 0.578 | 0.607 | 0.594 |
| GRAM-SCHMIDT | 0.562 | 0.600 | 0.589 |
| IHS LINEAR | 0.559 | 0.599 | 0.581 |
| IHS NONLINEAR | 0.566 | 0.542 | 0.558 |
| HAAR | 0.597 | 0.626 | 0.604 |
| DAUBECHIES | 0.584 | 0.613 | 0.595 |
| COIFLET | 0.587 | 0.617 | 0.598 |
| SYMPLET | 0.584 | 0.613 | 0.595 |
| Proposed | 0.592 | 0.601 | 0.593 |

де $X = \{x_{ij}\}, Y = \{y_{ij}\}$ — зображення, що порівнюються; M, N — розміри зображення; σ_{xy} — коваріація між x і y, σ_x^2 і σ_y^2 — відхилення.

У табл. 4 наведено значення *SSIM* для кожного із методів злиття за трьома каналами.

ВИСНОВКИ

Отримані характеристики свідчать про те, що обробка багатоспектральних знімків за допомогою нової інформаційної технології на основі ІСА- та вейвлет-перетворень у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. Синтезоване зображення має вищу інформативність, ніж первинні знімки без колірних спотворень. Про це свідчать значення отриманих характеристик SSIM, PSNR, CORR та ін. Дослідження показали, що значення інформаційної ентропії перевищує відповідні значення, отримані для результатів при використанні інших методів злиття.

Наші подальші дослідження будуть присвячені удосконаленню запропонованої технології із залученням інформації, отриманої в інфрачервоному діапазоні.

- 1. *Гнатушенко В. В., Кавац О. О.* Інформаційна технологія підвищення просторової розрізненості цифрових супутникових зображень на основі ІСА- та вейвлетперетворень // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. — 2013. — № 771. — С. 28—32.
- 2. Кавац О. О., Гнатушенко В. В., Сафаров О. О. Дослідження впливу характеристик вейвлетів на ефективність об'єднання фотограмметричних зображень // Пр. Таврійського держав. агротехн. ун-ту. Прикладна геометрія та інженерна графіка. — 2013. — Вип. № 4, 56. — С. 33—40.
- Akula R., Gupta R., Devi M. R. V. An efficient PAN sharpening technique by merging two hybrid approaches // Procedia Eng. – 2012. – 30. – P. 535–541. – http:// dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.895.
- Blum R. S., Liu Z. Multi-sensor image fusion and its applications. –NW: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. – 512 p.
- Chen F., et al. Fusion of remote sensing images using improved ICA mergers based on wavelet decomposition // Procedia Eng. – 2012. – 29. – P. 2938–2943. – http:// dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.418.
- 6. *Heng Chu, Weile Zhu*. Fusion of IKONOS satellite imagery using IHS transform and local variation // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.. 2008. 5, N 4.
- 7. *Hnatushenko V., Safarov A.* Computer technology more informative multispectral images of the earth surface //

Appl. Geometry and Engineering Graphics. – K.: KNU-BA, 2012. – Vol. 89. – P. 140–144.

- Li S. Multisensor remote sensing image fusion using stationary wavelet transform: effects of basis and decomposition level // Int. J. Wavelets Multiresolut. Inform. Process. – 2008. – 6, N 1. – P. 37–50.
- Nirmala D. E., Paul B. S., Vaidehi V. A novel multimodal image fusion method using shift invariant discrete wavelet transform and support vector machines // Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Information Technology, Jun. 3–5, 2011. — Chennai, Tamil Nadu: IEEE Xplore Press, 2011. — P. 932—937. — DOI: 10.1109/ICRTIT.2011.5972405.
- Pohl C., Van Genderen J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // Int. J. Remote Sens. – 1998. – 19, N 5. – P. 823–854.
- 11. Schowengerdt R. Remote sensing: Models and methods for image processing. New York: Acad. Press, 2007.
- Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C. A. Comparative analysis of image fusion methods // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 2005. – 43, N 6. – P. 1391–1402.

Стаття надійшла до редакції 10.11.14

В. В. Гнатушенко, А. А. Кавац, А. Л. Макаров, Д. П. Бражник

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СКАНЕРНЫХ ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Исследуются методы слияния, которые позволяют наиболее эффективно повысить информативность многоспектральных аэрокосмических изображений сверхвысокого пространственного разрешения с минимальными цветовыми искажениями. Полученные результаты свидетельствуют о том, что синергетическая обработка многоспектральных данных с помощью предложенной информационной технологии на основе ICA- и вейвлетпреобразований по сравнению с классическими методами слияния дает более качественный результат. Синтезированное изображение имеет повышенную информативность без спектральных искажений.

V. V. Hnatushenko, O. O. Kavats, O. L. Makarov, D. P. Brazhnik

AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF FUSION METHODS OF SCANNER AEROSPACE MULTISPECTRAL IMAGES

We study fusion methods allowing one most effectively to improve information content of multispectral aerospace high spatial resolution images with minimal color distortion. Our results indicate that the synergistic processing of multispectral data with the use of the proposed information technology on the basis of ICA- and wavelet transforms gives a better outcome as compared to the classical fusion methods. The synthesized image has some improved performance without spectral distortion.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

До статті В. В. ГНАТУШЕНКА та ін.



Рис. 2. Фрагменти супутникових зображень: 1 — первинне панхроматичне, 2 — первинне мультиспектральне, 3 — синтезоване за методом головних складових, 4 — за методом незалежних складових, 5 — за лінійною IHS-моделлю, 6 — за нелінійною IHS-моделлю, 7 — за методом HSV, 8 — за методом Брові, 9 — за методом Грама — Шмідта, 10 — з використанням вейвлетів Хаара, 11 — вейвлетів Добеші, 12 — вейвлетів Койфмана, 13 — симлетів, 14 — синтезоване за запропонованою технологією

До статті О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, Я. Д. ХОРКАВЦІВ



Рис. 1. Негативно гравітропна протонема (*a*) і гравітропний згин (*б*) столонів *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson

Puc. 2. Орієнтація проростків *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. залежно від вектора гравістимулу: *a* — спора з ризоїдом, який направлений донизу, та хлоронемою, що росте догори; *б*, *в* — після переорієнтації чашки на 90° і 360° утворився другий хлоронемний росток, який росте перпендикулярно (*б*) або паралельно до ризоїда (*в*)



Рис. 3. Вторинна гравітропна протонема гравістимульованих гаметофорів *Tortula modica* R. H. Zander (стрілка вказує на клітини основи листка, що регенерують найчастіше)



Рис. 4. Утворення бруньок гаметофорів у *Tortula modica* R. H. Zander залежно від дії гравітації: a, δ — на верхівкових клітинах протонеми в умовах 1*g*; b, c — вздовж протонемних столонів після клиностатування





Рис. 6. Негативно гравітропні гаметофори і протонема Bryum pseudotriquetrum (Hedw.) Р. Gaertn. et al. з Антарктики (a, δ) та Львова (s)

Формування спорогонів Bryum argenteum Hedw. в умовах 1g: стрілками позначено місця максимального нагромадження крохмалю у ніжках спорогону та шийці коробочки



Рис. 7. Виводкові тільця *Lep-tobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson: 1 — гравітропна протонема, 2 — інтенсивніше утворення виводкових тілець на гравітропній протонемі у темряві, ніж на світлі (3), 4 — пагін з ризоїдними виводковими тільцями

УДК 581.17:582.34

О. В. Лобачевська, Я. Д. Хоркавців

Інститут екології Карпат НАН України, Львів

ГРАВІЧУТЛИВІСТЬ В ОНТОГЕНЕЗІ МОХІВ

Визначено гравічутливість у нових видів мохів та проаналізовано особливості їхніх гравіморфозів на різних стадіях онтогенезу. Встановлено, що гравіреакції сприяють формуванню нового фенотипу і підвищенню фенотипної пластичності гаметофітної і спорофітної стадій онтогенезу бріофітів. Уперше показано, що гравітація сприяє активності вегетативного розмноження і відіграє важливу роль у реалізації репродуктивної стратегії мохів.

З розвитком космічної біології як об'єкт досліджень гравічутливості рослин почали використовувати мохи [5, 7, 11, 14, 22]. Бріофіти, як і судинні рослини, в ході еволюції виробили специфічні реакції на вплив гравітації, і протягом онтогенезу інколи кардинально змінюють орієнтацію росту відносно векторної дії земного тяжіння. На світлі протонема росте плагіотропно, а у темряві негативно гравітропно, що є найкоротшим шляхом столонів до світла. Перевагою мохів є й те, що гравіперцепція і ростова реакція на стадії протонеми не роз'єднані просторово і відбуваються в одній апікальній клітині. Листкостеблові пагони (гаметофори) верхоплідних бріофітів орієнтуються негативно гравітропно. Не змінюється напрям росту і на початку формування спорофіту, тоді як на завершальних стадіях, під час диференціації спорогенних тканин і формування коробочки у деяких гравічутливих видів ріст коробочки переорієнтовується на позитивно гравітропний. Зміна форми та просторової орієнтації спорогонів набули у мохів особливого значення, окрім того, вони є важливою таксономічною ознакою виду. Досліди на російському супутнику «Бион-11» і американській станції «Коламбія» за програмою «Шаттл-97» підтвердили перспективність дослідження клітинних механізмів гравіморфогенезу бріофітів, до того ж уперше було виявлено гравізалежні феномени — спіральний ріст протонеми та утворення бруньок гаметофорів із апікальних клітин протонеми [2, 4, 18, 21].

Різносторонні дослідження гравічутливості проводили переважно на ювенільній протонемній стадії розвитку [1, 4, 22, 23], проте робіт про гравітропні реакції у процесі онтогенезу мохів значно менше [11, 21]. Невелика кількість видів бріофітів, які досі використовувались в експериментальних дослідженнях гравіреакцій, спонукала до пошуку нових гравічутливих видів, придатних для вивчення ролі гравітації в життєвій стратегії цієї групи вищих рослин.

Нашим завданням було визначити гравічутливість у нових видів мохів і проаналізувати участь гравітації у їхньому морфогенезі на різних стадіях онтогенезу.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Стерильну протонему і гаметофори отримували зі спор або регенерацією пагонів на поживному середовищі Кноп П з 0.2 % глюкозою. Після висіву спор протонему вирощували на світлі у люмінестаті з 16 год фотоперіодом у контрольованих умовах освітлення (25—30 мкмоль·м⁻²c⁻¹), температури (20—22 °C) і вологості (80—90 %). Через 7 діб протонемні дернини збирали у клубки і переносили у темряву для гравістимуляції на 5—7 діб. Одночасно ставили досліди з протонемою на клиностаті.

Для аналізу проростання спор чашки встановлювали під різними кутами до горизонталі — від 90° до 180° і 360°. Через добу у темряві утворювався

[©] О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, Я. Д. ХОРКАВЦІВ, 2014

перший проросток, а через 48 год спостерігали появу другого проростка. Під світловим мікроскопом вимірювали кут між віссю у площині чашки та напрямом росту першого і другого ростка. Внаслідок регенерації гаметофорів у темряві на 10—12 добу отримували вторинну протонему, чашки з якою виставляли на 24 год на світло для диференціації бруньок. Аналізували особливості регенерації клітин гаметофорів: ріст вторинної протонеми, закладання бруньок та утворення пагонів.

Спостерігаючи за формуванням виводкових тілець на гравітропній протонемі *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson у темряві, на світлі (контроль) і клиностаті, визначали добу появи виводкових тілець та підраховували їхню кількість.

Проводили цитохімічні дослідження спорогонів *Bryum argenteum* Hedw. Спорогони, які перебували на різних стадіях розвитку, ізольовували від гаметофіту, і для аналізу крохмалю у статоцитах фарбували розчином I_2KI . Визначали наявність та зони розподілу амілопластів упродовж росту ніжки спорогону і формування коробочки на світлі та після клиностатування.

Усі види мохів зібрано в околицях м. Львова, крім того, для порівняльних досліджень використано *Bryum pseudotriquetrum* (Hedw.) Р. Gaertn. et al. з Антарктики. Досліди проводили у 3-кратній повторності і отримані дані опрацьовували статистично [6].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНІ ОБГОВОРЕННЯ

Визначено гравічутливість у восьми нових видів мохів. На підставі результатів аналізу цитологічних особливостей гравічутливих апікальних клітин — розміру й форми амілопластів, їхнього зонального розподілу і седиментації, а також швидкості росту — з'ясовано відмінності у диференціації та розвитку гаметофіту і спорофіту досліджуваних видів мохів. Для нових гравічутливих видів мохів визначено кореляцію між кількістю, розподілом амілопластів та швидкістю росту апікальних клітин (табл. 1). Установлено, що величина кута гравітропного згину прямо залежить від довжини зони седиментації амілопластів та швидкості росту столонів протонеми.

Амілопласти в апікальній клітині мали різні розміри і форму: від округлих і овальних до ве-

ретеноподібних, від великих (2.5...3.0 мкм) до дрібних (0.3...0.5 мкм). Пластиди розподілялися по-різному: окремо один від одного або у вигляді скупчень. Великі округлі амілопласти переважали в зоні седиментації, вони осідали найактивніше під час зміни напряму гравістиму, тоді як дрібні, круглі пластиди зосереджені перед ядром, лише частково змінювали своє положення, а веретеноподібні поза ядром майже не осідали.

Установлено, що в апексі верхівкової клітини більшості досліджених видів є зона без пластид, де інколи міститься багато тілець Гольджі, які постачають екзоцитозні везикули до зони росту [11]. У видів Dicranella cerviculata (Hedw.) Schimp., Leptobryum pyriforme, Bryum intermedium (Brid.) Brandow у зоні верхівки апікальної клітини часто виявляли один великий, рідше два амілопласти, які не седиментували. Визначено, що майже 50 % апікальних клітин гравітропної протонеми Dicranella cerviculata мають верхівковий амілопласт, що не впливає на ступінь гравічутливості клітини і швидкість седиментації пластид. У Dicranella cerviculata, Leptobryum pyriforme, Bryum argenteum чітко проявляється седиментація амілопластів, у інших видів — Dicranella varia (Hedw.) Schimp., D. heteromalla (Hedw.) Schimp., Bryum intermedium вона незначна, що корелює з нижчою гравічутливістю протонеми.

Величина кута гравітропного згину у *Leptobryum pyriforme*, який вирізняється серед інших видів пришвидшеним ростом, за 8 год гравістимуляції досягав 60° (рис. 1, див. кольорову вклейку). Початок згину у *L. pyriforme* та переміщення пластид у напрямку дії сили тяжіння візуально можна було побачити через 0.5—1 год після гравістимуляції. Із збільшенням тривалості гравістимуляції зростала кількість амілопластів, які осідали донизу.

Підрахунок амілопластів в апікальних клітинах свідчить, що їх кількість істотно не відрізнялася між видами і не залежала від ступеня гравічутливості моху (табл. 1). Проведені дослідження підтверджують думку, що кількість амілопластів не визначає гравічутливості видів. Можна також стверджувати, що гравічутливість мохів зростає із підвищенням довжини зони седиментації пластид і зменшенням співвідношення довжин клітини і зони з амілопластами (D/d, табл. 1).

| Вид | Кут гравітропного згину, град | Швидкість росту, мкм/год | Довжина клітини <i>D</i> , мкм | Довжина зони з амілопластами <i>d</i> , мкм | Кількість амілопластів | D/d |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------|------|
| Ceratodon purpureus | 85.5 ± 1.5 | 30.0 | 189.6 ± 10.8 | 113.2 ± 8.0 | 32.3 ± 1.5 | 1.67 |
| Dicranella cerviculata | 66.8 ± 3.2 | 25.1 | 185.2 ± 12.0 | 80.0 ± 4.1 | 27.5 ± 4.0 | 2.31 |
| Leptobryum pyriforme | 65.9 ± 1.8 | 24.2 | 211.2 ± 14.9 | 88.5 ± 4.3 | 26.0 ± 4.5 | 2.38 |
| Tortula truncata | 65.6 ± 2.9 | 20.0 | 198.0 ± 9.6 | 94.0 ± 8.0 | 27.1 ± 3.2 | 2.10 |
| Bryum argenteum | 41.1 ± 5.3 | 10.7 | 129.2 ± 4.7 | 54.9 ± 4.3 | 24.3 ± 1.1 | 2.35 |
| B. caespiticium | 37.2 ± 1.7 | 18.0 | 130.0 ± 24.1 | 54.0 ± 3.2 | 25.1 ± 1.3 | 2.41 |
| B. intermedium | 33.3 ± 3.4 | 17.3 | 110.7 ± 6.0 | 44.8 ± 16.0 | 25.8 ± 1.8 | 2.47 |
| Dicranella varia | 36.7 ± 1.6 | 15.2 | 101.5 ± 2.0 | 36.4 ± 2.0 | 23.5 ± 1.5 | 2.79 |
| D. heteromalla | 36.2 ± 1.7 | 23.3 | 167.3 ± 5.7 | 39.2 ± 17.5 | 24.0 ± 1.4 | 4.27 |

Таблиця 1. Показники гравічутливості апікальних клітин мохів

Гравізалежний ріст протонеми є видоспецифічною ознакою. У *Funaria hygrometrica* Hedw. і *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. гравічутливими є проростки спор [8], а у *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb., *Dicranella heteromalla, Barbula unguiculata* Hedw. лише з розвитком протонеми клітини починають реагувати на гравітацію [7]. Для таких видів мохів як *Dicranella heteromalla* і *D. varia* характерною є висока дисперсія кутів згину як негативно, так і позитивно гравітропних первинних ростків. Залежним від гравітації і світла для багатьох мохів є галуження клітин та кут нахилу галузок відносно осі росту ортотропного протонемного столону [9].

У кожній спорі перед проростанням визначали переважно по 5—8 амілохлоропластів, які ділилися, тому у ростках їхня кількість зростала до 10—12 (табл. 2).

Початково аполярні одноклітинні спори *С. ригригеиs* у темряві проростали позитивно гравітропним ризоїдом, а через добу з протилежного боку утворювався другий негативно гравітропний хлоронемний росток. Спостереження за проростанням спор мохів ілюструє важливість гравіморфізму. Вісь першого поділу закладалася відповідно до вектора гравітації, але залежно від умов гравістимуляції: якщо змінили положення чашок із спорами відносно вектора гравітації на 90° або 360°, другий проросток утворювався в іншому місці — перпендикулярно до першого або поряд з ним (рис. 2, див. кольорову вклейку).

Таблиця 2. Вміст амілохлоропластів у спорах і ростках гравічутливих видів

| | Кількість амілохлоропластів | | | |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Вид | перед про- ростанням спор | у спорі з двома ростками | у двох первинних ростках | |
| Bryum argenteum | 4.1 ± 0.3 | 5.2 ± 0.3 | 5.7 ± 0.4 | |
| B. caespiticium | 4.6 ± 0.3 | 5.9 ± 0.2 | 6.3 ± 0.4 | |
| Leptobryum pyriforme | 6.0 ± 0.3 | 8.7 ± 0.2 | 9.7 ± 0.4 | |
| Dicranella cerviculata | 8.5 ± 0.3 | 10.0 ± 0.3 | 13.3 ± 0.5 | |
| D. heteromalla | 5.6 ± 0.4 | 6.7 ± 0.4 | 7.2 ± 0.2 | |
| D. varia | 4.9 ± 0.3 | 5.5 ± 0.4 | 6.7 ± 0.4 | |
| Tortula truncata | 8.2 ± 0.4 | 9.9 ± 0.5 | 12.1 ± 0.5 | |
| Ceratodon purpureus | 7.5 ± 0.4 | 10.1 ± 0.4 | 11.6 ± 0.5 | |

Перед поділом клітини спостерігали гравізалежну міграцію ядра до місця майбутнього ростка. Порушення системи мікротрубочок антитубуліновими блокаторами інгібувало рух ядра і утворення ростка, що свідчить про участь цитоскелету у переміщенні ядра [14]. Подібний механізм гравіморфізму встановлено для детермінації дорзовентральної осі яйцеклітини *Fucus distichum* L. [20, 24]. Гравізалежний ріст як першого ризоїдного, так і другого хлоронемного ростків, слід розглядати як адаптивну реакцію, що сприяє закріпленню невеликих мохових рослин у субстраті, а головне — виходу на світло автотрофних клітин протонеми. Гравічутливість проаналізованих видів відрізнялася залежно від стадій розвитку гаметофіту. Листкостеблові пагони *Leptobryum pyriforme* були менше гравічутливими ($32.3 \pm 1.3^{\circ}$), ніж протонема ($65.9 \pm 1.8^{\circ}$). Гравічутливість регенеративної протонеми, яка утворилася з пагонів, порівняно з протонемиою із спор, знижувалася у *Bryum argenteum* і *Dicranella varia*. У *Bryum caespiticium* Hedw. і *Tortula truncata* (Hedw.) Mitt., навпаки, гравічутливішою була регенеративна протонема з пагонів.

Численні столони вторинної протонеми утворювалися у темряві внаслідок регенерації гравістимульованої протонеми *Tortula modica* R. H. Zander (рис. 3, див. кольорову вклейку).

Одним із проявів гравіморфозів у мохів є формування на апікальних клітинах таких вторинних столонів бруньок гаметофорів (рис. 4, див. кольорову вклейку). Уперше це явище було відзначене для протонеми *T. modica* у досліді на космічному кораблі Shuttle'97 [2], а згодом для інших видів в умовах 1g і після клиностатування [3].

Відомо, що диференціація клітин протонеми і брунькоутворення залежать від фітогормонів [3, 10]. Передумовою їхнього формування є зменшення довжини клітин унаслідок пришвидшеного поділу ядра і утворення косих клітинних перетинок. Саме нахилом клітинних перетинок вирізняється стадія каулонеми, клітини якої компетентні до розвитку гаметофорів. Каулонемні клітини чутливі до цитокініну завдяки наявності білків посередників, яких немає у клітинах хлоронеми [12]. Установлено, що цитокінін в морфогенезі гравітропної протонеми деяких видів, і зокрема *Т. modica*, проявляє певну специфічну дію залежно від сили тяжіння. Так, після гравістимуляції і перенесення протонеми із темряви на світло під впливом цитокініну спостерігали масове утворення бруньок на апікальних клітинах, чого зазвичай у нормі не відбувалося. Мабуть, гравітація підсилила атракцію і переміщення метаболітов до верхівки апікальної клітини, що сприяло фізіологічній поляризації клітини і локальній диференціації бруньок. Якщо вектор гравітації знімали клиностатуванням, унаслідок послаблення полярного транспорту фітогормонів бруньки закладалися по всій довжині столонів (рис. 4 в, г). Раніше встановлено, що гравіморфогенез двох цитотипів *Т. modica* істотно відрізнявся співвідношенням фітогормонів [3]. На гаплоїдній протонемі активація бруньок була сильнішою, ніж на диплоїдній, окрім того, цитотипи відрізнялися морфологічно способом галуження. Зроблено висновок, що диплоїд, порівняно з гаплоїдом, має вищий ендогенний вміст ІОК і нижчий — цитокініну.

Досліджували вплив гравітації на просторову орієнтацію та морфогенез спорофіту мохів. Установлено, що спорогони формуються як біполярна структура з апікальним і базальним центрами росту, напрям якого змінюється відносно вектора гравітації. Унаслідок базального росту спорофіт вростав у тканини гаметофіту, і на цій стадії орієнтувався негативно гравітропно. Активація апікального ростового центру збігалася з припиненням базального росту і переорієнтацією позитивно гравітропної реакції на негативну [7].

У зафарбованих J_2KJ ізольованих молодих спорогонах амілопласти переважно нагромаджувалися у клітинах стопи і верхньої апікальної ростової зони. На ніжках сформованих спорогонів виділялися локальні клітини (статоцити) з амілопластами (статолітами). Під час росту ніжки спорогону статоцити розміщувалися окремими зонами, а перед формуванням коробочки відбувався перерозподіл статоцитів, і крохмальні зерна максимально нагромаджувалися у шийці коробочки (рис. 5, див. кольорову вклейку). Надалі саме у цій зоні ніжка спорогону згиналася, і найбільше амілопластів було на випуклому боці ніжки спорогону, а найменше — на увігнутому.

Горизонтальне клиностатування гаметофорів на стадії формування коробочки не лише знижувало реорієнтацію ніжки спорогону, а й інгібувало диференціацію тканин коробочки. Це впливало на завершення формування тканин коробочки, і, як наслідок, утворювалися лише ззовні зрілі коробочки з недиференційованою спорогенною тканиною або стерильними спорами. Після клиностатування часто змінювалася форма коробочки. У *Pohlia nutans* та *Bryum intermedium* утворювалися майже прямовисні коробочки без видимого згину ніжки спорогону, у *Bryum argenteum* замість симетрично-видовжених — кулясті, часто викривлені коробочки. Таким чином, гравізалежною є просторова орієнтація коробочок одних видів мохів, для інших — гравізалежним є формування видоспецифічних коробочок. Окрім того, що форма і просторова орієнтація коробочки є таксономічною ознакою, утворення схиленої коробочки є гравіадаптивною ростовою реакцією. У видів, які поселяються першими на порушених субстратах, із нахилених коробочок спори висіваються поблизу батьківських дернин, що завдяки локальному закріпленню і розростанню дернини сприяє швидкому заселенню мохами більшої території.

Окрім того, що гравітація та інші екологічні фактори беруть участь у регуляції морфогенезу бріофітів на різних стадіях онтогенезу [3, 21, 23], земне тяжіння впливає і на репродуктивну стратегію мохів. Важливою формою репродуктивної біології мохів є регенераційна здатність як найпростіший і водночас найпоширеніший спосіб вегетативного розмноження [16, 17]. З огляду на морфогенез суть регенерації мохів полягає в тому, що у певних умовах будь-яка ізольована клітина гаметофіту чи спорофіту може утворити вторинну протонему (зі спорофіту диплоїдну), на якій швидше, ніж на первинній протонемі зі спор, розвиваються листкостеблові пагони і відновлюється цілісність дернин.

На основі дослідження регенерації гаметофорів двох форм *Bryum pseudotriquetrum* із відмінних екологічних умов установлено, що гаметофори з Антарктики чутливіші до впливу гравітаційної сили: регенерантів під час гравістимуляції утворювалося більше, ніж у моху зі Львова (рис. 6, див. кольорову вклейку). Натомість протонема *B. pseudotriquetrum* з Антарктики менш чутлива, ніж зі Львова. На гаметофорах антарктичної форми *B. pseudotriquetrum* після гравістимуляції утворювалися численні спеціалізовані виводкові бульбочки, тоді як у моху зі Львова — на ризоїдах протонеми.

Отримані результати свідчать, що гравічутливість *B. pseudotriquetrum* на різних стадіях онтогенезу формується залежно від екологічних умов. Мабуть, адаптація до умов короткого вегетаційного періоду Антарктики сприяла підвищенню гравічутливості гаметофорів моху та гравізалежного вегетативного розмноження. Таким чином, завдяки участі гравітації у формотворчих процесах сформувалися відмінності у життєвій стратегії обох форм *B. pseudotriquetrum*. У зв'язку з тим гравівідчуття гаметофорів збереглося у життєвій стратегії *B. pseudotriquetrum* як надійний засіб для забезпечення тропізмів та розмноження в умовах впливу стресових абіотичних факторів Антарктики. Лише утворення негативно гравітропних гаметофорів і вегетативне розмноження виводковими бульбочками, а не гравічутливість протонемної стадії, могли забезпечити виживання рослин і розмноження під час короткотривалого весняного періоду Антарктики.

Зазвичай більшість однодомних видів мохів розмножуються спорами, однак безстатева репродукція є ключовим фактором життєвої стратегії дводомних видів та ефективним механізмом швидкого заселення і закріплення рослин на порушеній території [15]. Уперше для гравічутливого виду Leptobryum pyriforme встановлено, що розвиток виводкових тілець як органів вегетативного розмноження і запасання поживних речовин — явище гравізалежне. Показано, що у темряві виводкові тільця L. pyriforme утворюються значно швидше і удвічі у більших кількостях, ніж на світлі (рис. 7, див. кольорову вклейку). Після клиностатування дернин L. pyriforme виводкові тільця утворювалися із запізненням і менше порівняно з гравістимульованою дерниною.

На нашу думку, *L. pyriforme* слід виділити серед проаналізованих видів завдяки високій швидкості росту і розвитку, а також різноманітності гравізалежних ростових реакцій.

висновки

Просторова орієнтація органів гаметофіту і спорофіту мохів є гравізалежним процесом.

Визначено особливості гравіреакцій мохів на різних стадіях онтогенезу, які сприяють формування нового фенотипу і підвищенню фенотипної пластичності.

Вперше показано, що гравітація відіграє важливу роль у реалізації репродуктивної стратегії мохів унаслідок зміни гравічутливості окремих стадій онтогенезу і активації вегетативного розмноження.

- Демкив О. Т., Хоркавцив Я. Д., Кардаш А. Р и др. Взаимодействие света и гравитации в ростовых движениях протонемы мхов // Физиол. растений. — 1997. — 44, № 2. — С. 205—211.
- Демків О. Т., Кордюм Є. Л., Таїрбеков М. Г. та ін. Гравіморфогенез протонеми листяних мохів // Доп. НАН України. Сер. Біол. — 1998. — № 7. — С. 163—166.
- Демків О. Т., Кордюм Є. Л., Хоркавців Я. Д. та ін. Умови гравітації — експериментальна база для пізнання закономірностей морфогенезу рослин в гравітаційному полі // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 5/6. — С. 30—35.
- Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Кияк Н. Я. та ін. Вплив гравітації на фотоморфогенез протонеми Pottia intermedia (Turn.) Furnr., Pottiales // Укр. бот. журн. — 2005. — 62, № 3 — С. 329—337.
- Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Пундяк О. І. Гравітація як формотворчий фактор розвитку мохів / Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку. — Київ: Логос, 2009. — Т. 2. — С. 403—408.
- 6. Лакин Г. Ф. Биометрия. М. : Высш. шк., 1990. 352 с.
- Лобачевська О. В. Нові види мохів з гравітропною протонемою // Наукові основи збереження біотичної різноманітності: Темат. зб. Ін-ту екології Карпат НАН України. — Львів: Ліга-Прес, 2006. — Вип. 6. — С. 137—143.
- 8. Пундяк О. І., Демків О. Т., Хоркавців Я. Д., Багрій Б. Б. Полярність проростання спор *Funaria hygrometrica* Hedw. // Космічна наука і технологія. 2002. 8, № 1. С. 96—100.
- Хоркавців Я. Д., Кияк Н. Я., Кіт Н. А. Гравізалежний морфогенез мохів // 14-та Укр. конф. з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород). — Ужгород, 2014. — С. 71.
- Bopp M. Development Physiology of Bryophytes // New Mannual / Ed. R. V. Schuster. — The Hattori Bot. Lab., Nichinan, 1983. — P. 276—324.
- Chaban Ch. I., Kern V. D., Ripetskyj R. T., et al. Gravitropism in caulonemata of the moss *Pottia intermedia* // J. Bryol. – 1998. – 20. – P. 287–299.
- Cove D., Bezanilla M., Harries Ph., Quatrano R. Mosses as model systems for the study of metabolism and development // Ann. Rev. Plant Biol. — 2006. — 57. — P. 497— 520.
- Demkiv O. T., Khorkavtsiv Ya. D. Pundiak O. I. Changes of protonemal cell growth related to cytoskeleton organization // Cell Biology International. — 2003. — 27, N 3. — P. 187—189.
- Demkiv O. T., Kordyum E. L., Kardash O. R., Khorkavtsiv O. Ya. Gravitropism and phototropism in protonemata of the moss *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. // Adv. Space Res. – 1999. – 23, N 12. – P. 1999–2004.
- Frey W., Kürschner H. Asexual reproduction, habitat colonization and habitat maintenance in bryophytes // Flora. – 2010. – 4, N 20. – P. 1–12.
- Glime G. M. Ecophysiology of development: fragment / Bryophyte ecology // 2006 http: // www. bryoecol. mtu. edu

- Graf M. D., Rochefort L. Moss Regeneration for Fen Restoration: Field and Greenhouse Experiments // Restoration Ecology. – 2008. – P. 1–10.
- Kern V. D., Schwuchow J. M., Reed D. W., et al. Gravitropic moss cells default to spiral growth on the clinostat and in microgravity during spaceflight // Planta. – 2005. – 221. – P. 149–157.
- Lobachevska O. V., Demkiv O. T., Ripetskyj R. T. Influence of gravity on spatial orientation and morphogenesis of moss sporophytes // Adv. Space Res. 1998. 21, N 8/9. P. 1141–1144.
- 20. *Nick P*. Microtubule, signalling and abiotic stress // Plant J. 2013. **75** (2). P. 309-323.
- Ripetskyi R. T., Kit N. A., Chaban Ch. I. Influence of gravity on the photomorphism of secondary moss protonemata // Adv. Space Res. – 1999. – 23, N 12. – P. 2005–2010.
- Sack F. D. Plant gravity sensing // Int. Rev. Cytol. 1991. – 127. – P. 193–252.
- Schwuchow J. M., Kern V. D., White N. J., Sack F. Concervation of the plastid sedementation zone in all moss genera with known gravitropic protonemata // J. Plant Growth Regul. 2002. 21. P. 146–155.
- 24. Sun H., Basu S., Brady S. R., et al. Interaction between auxin transport and the actin cytoskeleton in developmental polarity of *Fucus distichus* embryos in response to light and gravity // Plant Physiol. – 2004. – 135. – P. 266–278.

Стаття надійшла до редакції 27.10.14

О. В. Лобачевская, Я. Д. Хоркавцив

ГРАВИЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В ОНТОГЕНЕЗЕ МХОВ

Определена гравичувствительность новых видов мхов и проанализированы особенности их гравиморфозов на различных стадиях онтогенеза. Установлено, что гравиреакции способствуют формированию нового фенотипа и индуцируют повышение фенотипической пластичности гаметофитной и спорофитной стадий онтогенеза бриофитов. Впервые показано, что гравитация стимулирует вегетативное размножение и несомненно играет важную роль в реализации репродуктивной стратегии мхов.

O. V. Lobachevska, Ya. D. Khorkavtsiv

GRAVISENSITIVITY IN THE MOSS ONTOGENESIS

Gravisensitivity in new moss species was determined and some peculiarities of their gravimorphoses on different stages of the ontogenesis were analyzed. It was established that gravireactions promote the formation of new phenotype and increase in phenotypic plasticity of the gametophytic and sporophytic stages of bryophytes ontogenesis. It was shown for the first time that gravity facilitates vegetative reproduction activity and plays an important role in the realization of reproductive strategy of mosses. До статті В. В. ГНАТУШЕНКА та ін.



Рис. 2. Фрагменти супутникових зображень: 1 — первинне панхроматичне, 2 — первинне мультиспектральне, 3 — синтезоване за методом головних складових, 4 — за методом незалежних складових, 5 — за лінійною IHS-моделлю, 6 — за нелінійною IHS-моделлю, 7 — за методом HSV, 8 — за методом Брові, 9 — за методом Грама — Шмідта, 10 — з використанням вейвлетів Хаара, 11 — вейвлетів Добеші, 12 — вейвлетів Койфмана, 13 — симлетів, 14 — синтезоване за запропонованою технологією

До статті О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, Я. Д. ХОРКАВЦІВ



Рис. 1. Негативно гравітропна протонема (*a*) і гравітропний згин (*б*) столонів *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson

Puc. 2. Орієнтація проростків *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. залежно від вектора гравістимулу: *a* — спора з ризоїдом, який направлений донизу, та хлоронемою, що росте догори; *б*, *в* — після переорієнтації чашки на 90° і 360° утворився другий хлоронемний росток, який росте перпендикулярно (*б*) або паралельно до ризоїда (*в*)



Рис. 3. Вторинна гравітропна протонема гравістимульованих гаметофорів *Tortula modica* R. H. Zander (стрілка вказує на клітини основи листка, що регенерують найчастіше)



Рис. 4. Утворення бруньок гаметофорів у *Tortula modica* R. H. Zander залежно від дії гравітації: a, δ — на верхівкових клітинах протонеми в умовах 1*g*; b, c — вздовж протонемних столонів після клиностатування





Рис. 6. Негативно гравітропні гаметофори і протонема Bryum pseudotriquetrum (Hedw.) Р. Gaertn. et al. з Антарктики (a, δ) та Львова (s)

Формування спорогонів Bryum argenteum Hedw. в умовах 1g: стрілками позначено місця максимального нагромадження крохмалю у ніжках спорогону та шийці коробочки



Рис. 7. Виводкові тільця *Lep-tobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson: 1 — гравітропна протонема, 2 — інтенсивніше утворення виводкових тілець на гравітропній протонемі у темряві, ніж на світлі (3), 4 — пагін з ризоїдними виводковими тільцями

УДК 62.192

А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал, А. Л. Мороз, И. В. Шаповал, Н. Э. Скрынская Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

РЕСУРС И НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ С КАПИЛЛЯРНЫМИ СТРУКТУРАМИ ВОЛОКНИСТОГО СТРОЕНИЯ

Представлены результаты ресурсных испытаний тепловых труб с капиллярными структурами волокнистого строения. Трубы предназначены для систем охлаждения и термостатирования космической и авиационной аппаратуры. Ресурсные исследования, проведенные с 1975 г. по настоящее время, продемонстрировали, что тепловые трубы, разработанные в Институте проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, являются высоконадёжными и долговечными теплопередающими устройствами.

введение

Вопросы надёжности работы и долговечности тепловых труб (TT), в том числе космического и авиационного назначения [1, 2, 4], важны для практического инженерного применения TT в разработках систем охлаждения и термостатирования приборов, устройств и оборудования при длительных сроках их функционирования в сложных эксплуатационных условиях.

С целью решения проблем надёжности тепловых труб в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины на протяжении длительного периода, с 1975 г., непрерывно и по настоящее время проводятся ресурсные испытания ТТ. Целью таких испытаний является исследование долговечности ТТ, а также влияния времени на работоспособность и на теплофизические характеристики теплопередающих устройств такого типа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТА

Использование тепловых труб в промышленных масштабах позволяет успешно решать ряд сложных задач теплообмена, в частности в сложных условиях эксплуатации новой техники. Ресурсные испытания тепловых труб позволяют практически и с высокой степенью достоверности оценивать эффективность технологических решений.

Выход из строя тепловых труб (внезапный или прогнозируемый) обусловлен обычно химической несовместимостью конструкционных материалов TT с рабочей жидкостью-теплоносителем. Второй фактор, обусловливающий отказы TT — несовершенство производственных технологий и некачественные технологические операции в процессе изготовления труб. При отказах TT либо разрушаются её элементы (с потерей необходимой герметичности), либо происходит химическое разложение жидкости-теплоносителя.

Дистиллированная вода в большинстве практических задач, решаемых при разработке систем охлаждения приборов и устройств, является наиболее подходящей жидкостью. Вода не токсична, обладает высокими теплофизическими характеристиками, пожаробезопасна и пр. К числу недостатков относятся высокие значения давления внутри ТТ (~1.5 МПа при 200 °С) и неудовлетворительная химическая совместимость с большинством сталей и сплавов на основе стали.

Внутри тепловых труб, созданных из коррозионностойких сталей и заполненных водой, в результате взаимодействия элементов ТТ с теплоносителем происходит постепенное разрушение пассивного поверхностного слоя, образованно-

[©] А. Г. КОСТОРНОВ, А. А. ШАПОВАЛ, А. Л. МОРОЗ,

И. В. ШАПОВАЛ, Н. Э. СКРЫНСКАЯ, 2014



Рис. 1. Экспериментальный стенд для ресурсных исследований низкотемпературных тепловых труб

го химически адсорбированным кислородом на поверхности металлических элементов (корпуса TT и её капиллярной структуры). На некоторых участках TT вода или водяной пар вступают в электрохимическую реакцию с железом. При этом происходит незначительное выделение водовода. Водород скапливается в конце конденсационной зоны TT, блокируя при этом часть её теплоотводящей поверхности. Для увеличения ресурса устойчивой работы ТТ из коррозионностойких сталей (важных для практического применения в космической аппаратуре) рекомендуется:

1) использование сталей с содержанием углерода меньше 0.03 %,

2) легирование сталей молибденом,

3) создание защитных поверхностных слоёв методом травления элементов TT,

4) интенсификация образования пассивирующего слоя на внутренних поверхностях ТТ (длительное низкотемпературное оксидирование),

5) использование качественной бидистиллированной воды и пр.

Одним из методов решения проблем совместимости сталей с водой является омеднение её внутренней поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Создан экспериментальный стенд (рис. 1), посредством которого осуществляются ресурсные испытания ТТ. В состав стенда входят шесть тепловых труб с металлическими волокновыми капиллярными структурами (КС): медными (медь марки М1) и КС, выполненными из коррозионностойкой стали (9Х18Н10Т). Выбор материалов ТТ и КС обусловлен в основном диапазоном величин теплопроводности исходных металлов. Рабочая жидкость-теплоноситель — дистиллированная вода. Обоснованием использования воды в ТТ является её приемлемый для систем охлаждения рабочий температурный диапазон и нетоксичность.

Тепловые трубы установлены в горизонтальном положении и снабжены электронагревате-

| № | Материал корпуса | Материал капиллярной структуры | Пористость капилярной структуры, % | Длина, мм | Диаметр, мм | Диаметр волокон, мкм |
|---|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------|----------------|-------------------------|
| 1 | медь | медь | 78 | 250 | 12 | 40 |
| 2 | медь | медь | 78 | 250 | 12 | 40 |
| 3 | сталь | сталь неоксидированная | 78 | 250 | 12 | 30 |
| 4 | сталь | сталь оксидированная | 78 | 250 | 12 | 30 |
| 5 | медь | медь | 78 | 250 | 12 | 40 |
| 6 | сталь | медь оксидированная | 78 | 250 | 12 | 40 |
| 0 | CILLID | медь оксидированная | 70 | 250 | 12 | 10 |

Параметры и характеристики опытных тепловых труб

лями, алюминиевыми теплоотводами-радиаторами, термопарами, предназначенными для измерения температур ТТ. Термопары расположены вдоль внешней поверхности корпусов ТТ. Тепловые трубы функционируют циклически, по девять часов в сутки. Стенд снабжён электросчётчиком, позволяющим контролировать время функционирования ТТ под нагрузкой.

Медные ТТ снабжены высокопористыми медными капиллярными структурами, которые предварительно, для лучшего смачивания их водой, были подвергнуты оксидированию (нагрев на воздухе до 250 °C). Трубы № 3, 4 из стали (см. таблицу) снабжены стальными КС (из аналогичной стали); при этом КС в трубке № 4 также подвергалась оксидированию. Стальная труба № 6 имела капиллярную структуру из меди, которая припекалась к внутренней поверхности корпуса с предварительно нанесенным медным покрытием. Опытные ТТ неоднократно подвергались так называемым «ударным» испытаниям, во время которых они функционировали в режиме периодических кратковременных включенийвыключений.

Характеристики ТТ с волокновыми капилярными структурами представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты ресурсных испытаний ТТ представлены на рис. 2, 3. Первые 11000 часов тепловые трубы функционировали непрерывно, при охлаждении их конденсационных зон проточной водой. При этом подводимая к ТТ мощность составляла 20 Вт. Затем ТТ работали в циклических режимах (периодичность включения — 9 ч), с воздушным охлаждением (отвод тепла — через ребристый радиатор). Количество циклов на первоначальном этапе регулярных испытаний — более 400 опытов. В дальнейшем испытания ТТ осуществлялись постоянно.

До настоящего времени, как свидетельствуют ют полученные результаты, все испытываемые трубы функционируют без отказов. По истечении 100000 часов функционирования тепловые трубы являются полностью работоспособными. На рис. 2 представлены результаты испытаний медных труб с медными капиллярными струк-



Рис. 2. Изменение со временем термического сопротивления *R* медных тепловых труб №№ 1, 2 и 5 с медными волокновыми капиллярными структурами



Рис. 3. Изменение со временем термического сопротивления R тепловых труб №№ 3, 4 и 6 из коррозионностойкой стали со стальными и медными волокновыми капиллярными структурами



Рис. 4. Блок тепловых труб, подготовленных для космических экспериментов

турами в виде зависимости термического сопротивления R [K/BT] (одной из основных физикотехнических характеристик тепловой трубы) от времени t.

Анализ полученных данных свидетельствует, что данная характеристика практически не изменяется в течение достаточно большого временного периода. Разброс значений измеряемых температур по длине TT связан с изменением температур в лабораторном помещении, однако диапазон термических сопротивлений при этом остаётся неизменным.

Тепловые трубы, выполненные из омедненной внутри коррозионностойкой стали, снабжённые медными капиллярными структурами, в процессе длительного функционирования не снижают своих теплопередающих характеристик (рис. 3). Несколько иначе изменяется аналогичная характеристика *R* тепловых труб, корпуса и капиллярные структуры которых выполнены из коррозионностойкой стали. Стальные ТТ №№ 3 и 4 с капиллярной структурой из коррозионностойкой стали на протяжении длительных сроков эксплуатации работают устойчиво. Однако их термические сопротивления R с течением времени увеличиваются в 4-6 раз. Этот факт в теории тепловых труб известен; он объясняется некоторым увеличением количества водорода внутри трубы, выделяемым как корпусом ТТ, так и развитой поверхностью пористой капиллярной структуры. Наличие водорода несколько ухудшает теплофизические характеристики таких ТТ, однако не нарушает (существенно) процесс функционирования испытываемых теплопередающих устройств. В тоже время в коррозионностойкой TT № 6 с медной капиллярной структурой значения термического сопротивления со временем остаются практически неизменными, что свидетельствует о её высокой надёжности и работоспособности.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор конструкции тепловых труб низкотемпературного диапазона, предназначенных для космического эксперимента (КЭ) «Трубка», реализация которого предполагается на борту Международной космической станции (МКС) [3], выполнен с учётом результатов ресурсных испытаний ТТ. Одной из целей такого эксперимента является изучение влияния микрогравитации на теплофизические характеристики и параметры работоспособности ТТ, функционирующих в космических условиях. Влияние временных факторов на характеристики ТТ, находящихся (и хранящихся некоторое время) на борту МКС, должно быть минимальным. По этой причине, руководствуясь полученными данными о надёжности ТТ, для выполнения КЭ были отобраны медные ТТ с медными капиллярными структурами (рис. 4).

выводы

1. Тепловые трубы с металлическими волокновыми капиллярными структурами являются высоконадёжными двухфазными теплопередающими устройствами, обладающими большим ресурсом работоспособности и долговечности.

2. Медные тепловые трубы с медными капиллярными структурами способны функционировать длительно, без ухудшения основных теплофизических характеристик.

3. Применение воды в качестве жидкости-теплоносителя в тепловых трубах из нержавеющей стали со стальными капиллярными структурами возможно для TT, использование которых ограничено непродолжительными сроками эксплуатации.

Работа выполнена при поддержке Государственного космического агентства Украины (Договор № 378 от 05.03.2014 г. «Разработка и исследование характеристик и параметров миниатюрных и плоских тепловых труб с композиционными капиллярными структурами, предназначенных для систем термостабилизации космического и авиационного оборудования»).

- 1. Воронин Г. Н., Ревякин А. В., Сасин В. Я. и др. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1978. — 200 с.
- 2. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. — К.: Техника, 1983. — 128 с.
- 3. Косторнов А. Г., Фролов Г. А., Шаповал А. А. и др. Научная аппаратура для проведения космического экспе-

римента «Трубка» в гермообъёме российского сегмента МКС // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 3. — С. 5—10.

Косторнов А. Г., Шаповал А. А., Фролов Г. А. и др. Тепловые трубы с капиллярными структурами на основе композиционных градиентных материалов для теплообменных систем космического и авиационного назначения // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 2. — С. 69—79.

Стаття надійшла до редакції 18.09.14

А. Г. Косторнов, А. А. Шаповал,

А. Л. Мороз, И. В. Шаповал, Н. Э. Скрынская

РЕСУРС ТА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ ТРУБ З КАПІЛЯРНИМИ СТРУКТУРАМИ ВОЛОКНИСТОЇ БУДОВИ

Представлено результати ресурсних випробувань теплових труб з капілярними структурами волокнистої будови, призначених для систем охолодження і термостатування космічної та авіаційної апаратури. Ресурсні дослідження, проведені з 1975 р. по теперішній час, продемонстрували, що теплові труби, розроблені в Інституті проблем матеріалознавства НАН України, є високонадійними і довговічними теплопередавальними пристроями.

A. G. Kostornov, A. A. Shapoval, A. L. Moroz, I. V. Shapoval, N. E. Skrynskaia

RESOURCES AND RELIABILITY OF HEAT PIPES WITH FIBER CAPILLARY STRUCTURE

Some results of long-term endurance tests for heat pipes (HP) with capillary fiber structures are presented. The HP tested are primarily intended for the use in cooling and temperature control of space and aviation equipment. A special stand was created for endurance tests conducting for heat pipes. Six heat pipes with copper and corrosion-resistant casing and capillary structures have been constantly tested for 40 years, since 1975. The tests showed that a copper heat pipe with copper capillary structures can normally function over a very long period. At the same time, thermal characteristics of such heat pipes are almost not changed. In contrast to copper heat pipes, HP with corrosion-resistant casing and steel capillary structures increased their thermal resistance. As this takes place, such HP also worked without a hitch.

УДК 621.763

О. В. Кириченко¹, В. Н. Клименко¹, И. А. Гусарова², И. В. Шаповал¹, Ю. А. Шевляков³

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ ² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ ³ Інститут хімії поверхні ім. А. А. Чуйка Національної академії наук України, Київ

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПОРИСТЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭКРАНИРОВАНИЯ

В результате различных способов консолидирования (спекания, аэрозольного склеивания, соединения с углепластиком) дискретных и непрерывных волокон сталей аустенитного (марки 1X18Н9Т, диаметром 10 и 30 мкм) и ферритного (марки Ст. 10, диаметром 40—100 мкм) классов получены высокопористые (пористостью 86—91 %) оптически прозрачные и газопроницаемые тонколистовые (толщиной 0.5—1.0 мм, плотностью 0.71—1.01 г/см³) и плотные (композиционные: углепластик + металлические волокна, толщиной 1.6—2.5 мм, плотностью 1.05—2.07 г/см³) материалы с эффективностью экранирования 68.5—96.0 дБ. Полученные экранирующие материалы могут быть использованы для изготовления корпусов электронной аппаратуры.

введение

Электронная вычислительная и измерительная техника, которая базируется на наземных, воздушных, морских и космических объектах, требует защиты от помех, создаваемых различными источниками электромагнитного излучения (ЭМИ). Кроме того, как высокочастотное, так и низкочастотное ЭМИ оказывает вредное влияние на организм человека. Источниками таких ЭМИ являются бытовая электротехника, мобильная телефонная связь, высоковольтное и высокочастотное промышленное электрооборудование и др. В настоящее время также актуальны проблемы защиты компьютеров банков и офисов фирм от так называемого «электронного терроризма», обеспечения электромагнитной изоляции служебных помещений, в которых обсуждается конфиденциальная информация, и телефонных коммуникаций от возможности прослушивания. Во всех этих случаях необходимо экранирование источника ЭМИ или объекта, который подвержен его воздействию. Для этого целесообразно использование соответствующих материалов и покрытий. К их числу относятся: металлические листы, фольги, сетки, специальные ткани и краски. Однако эти материалы работают только на отражение ЭМИ. Иногда этого недостаточно, так как отражение ЭМИ внутри корпуса радиоэлектронной аппаратуры часто становится причиной сбоя в её работе. Соответственно необходимо поглощение собственного ЭМИ и требуются экраны со способностью поглощать значительную долю энергии электромагнитных волн, т. е. обладать с электронной аппаратурой электромагнитной совместимостью. Согласно литературным данным, наиболее эффективными в этом смысле являются композиционные материалы, состоящие из металлических волокон и полимерного связующего, обладающего электрической проводимостью. Непрерывная электрическая цепь между металлическими волокнами образуется даже при их объемном содержании в материале менее 1 %; другие на-

[©] О. В. КИРИЧЕНКО, В. Н. КЛИМЕНКО, И. А. ГУСАРОВА, И. В. ШАПОВАЛ, Ю. А. ШЕВЛЯКОВ, 2014
полнители, например металлические порошки, требуют значительно большего содержания. К тому же металлические волокна не только отражают электромагнитную энергию как металлы, но и поглощают её как симметричные антенны (диполи). При этом более высоким уровнем экранирования ЭМИ обладают волокна из ферримагнитных металлов.

Известные зарубежные аналоги, например композиционные материалы, выпускаемые бельгийской фирмой «Bekaert corp.», состоящие из волокон коррозионностойкой стали BEKI-SHILD диаметром 4-22 мкм и пластмассы, успешно используют для изготовления корпусов компьютеров, изделий электрической и цифровой техники, применяемой на судах, самолётах и ракетах. Сведений об использовании пористых экранирующих материалов, например из спеченных или соединенных между собой какимлибо другим способом металлических волокон, в литературе нет. Пористые экраны были бы уместны в конструкциях электронной аппаратуры, требующей охлаждительной вентиляции или газообмена.

Цель работы — получить из волокон сталей ферритного и аустенитного классов образцы пористых (спеченных или склеенных) и плотных (композиционных) материалов в виде листовых заготовок, определить их экранировочные свойства.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве исходного сырья для изготовления образцов пористых и композиционных экранирующих материалов использовались металлические волокна (рис. 1):

— диаметром 40—100 мкм углеродистой стали марки Ст. 10 (ферритного класса);

— дробь — короткие (длиной около 2 мм) волокна диаметром 40—100 мкм стали марки Ст. 10, полученные при соответствующих режимах шевингования проволоки); использовали фракцию дроби + 250 мкм, отобранную методом рассева на стандартных ситах;

 диаметром 10 и 30 мкм коррозионностойкой стали марки 1Х18Н9Т (аустенитного класса); а также: — эпоксидная смола марки ЭДТ-10 (полимерное связующее в композиционных материалах);

— углеткань марки УТ-2 (для улучшения электрической проводимости между металлическими волокнами, поскольку эпоксидная смола является диэлектриком, и повышения механической прочности; кроме того, углеткань сама по себе является экранирующим материалом);

— клей (лак, краска) в аэрозольной упаковке.

Технологическая схема получения из металлических волокон образцов экранирующих материалов приведена на рис. 2.

Схема содержит двенадцать технологических цепочек (вариантов) получения образцов:

I — мерная резка \rightarrow формование \rightarrow спекание \rightarrow калибрование;

II — то же \rightarrow оксидирование или двойное оксидирование;

III — мерная резка \rightarrow формование \rightarrow аэрозольное склеивание;

IV — мерная резка \rightarrow оксидирование \rightarrow формование \rightarrow аэрозольное склеивание;

V — мерная резка \rightarrow формование \rightarrow спекание \rightarrow калибрование \rightarrow соединение с углепластиком;

VI — мерная резка \rightarrow (оксидирование) \rightarrow формование \rightarrow аэрозольное склеивание \rightarrow соединение с углепластиком;

VII — мерная резка \rightarrow формование \rightarrow соединение с углепластиком;



Рис. 1. Общий вид металлических волокон в состоянии поставки: 1 — бухта, 2 — катушки, 3 — жгуты, 4 — дробь (короткие волокна)



Рис. 2. Технологическая схема получения пористых и композиционных экранирующих материалов из металических волокон

VIII — мерная резка \rightarrow формование \rightarrow спекание \rightarrow калибрование \rightarrow оксидирование (двойное оксидирование) \rightarrow соединение с углепластиком.

IX — XII варианты применяли для дроби:

IX — оксидирование \rightarrow формование \rightarrow соединение с углепластиком;

 $X - формование \rightarrow$ соединение с углепластиком;

XI — соединение с углепластиком (дробь вводили в полимерное связующее);

XII — оксидирование → соединение с углепластиком (в смеси со связующим). Однако, учитывая возможность создавать из волокон и их фрагментов многослойные композиции, первоначально мы получили 14 видов образцов композиционных материалов, конструкции (структуры) которых показаны в табл. 1. В дальнейшем пористые образцы изготавливали однослойными, а композиционные — трехслойными (два наружных слоя — углеткань, внутренний — металлические волокна).

Мерную резку выполняли на разработанной в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины машине (рис. 3) гильотинно-

| Ĭ. |
|----------|
| Ξ |
| ୁମ୍ |
| Ē |
| E |
| Ĕ |
| 5 |
| 5 |
| Ξ |
| ē |
| OK |
| Ē |
| B |
| × |
| 5 |
| 5 |
| fe |
| Ľ. |
| 5 |
| 2 |
| 5 |
| X |
| 33 |
| 2 |
| 10 |
| aJI |
| Ш |
| ep |
| E |
| Ň |
| × |
| P |
| E |
| ē |
| Ē |
| N |
| 8 |
| Ē |
| 6 |
| K |
| 33 |
| E |
| ыč |
| 0 |
| E |
| e |
| 9 |
| F |
| õ |
| 5 |
| d |
| E |
| pa |
| K |
| 10 |
| 1 |
| bb |
| 2 |
| X |
| D. |
| E |
| ž |
| IK |
| ТИ |
| IC |
| ī |
| Te |
| aĸ |
| 'n |
| Xa |
| 2 |
| 1] |
| 'nа |
| m |
| <i>Q</i> |
| Ta |
| |

| гва вания | P | = 17 FFu | <-50 | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|------------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Свойс экраниро | K_{Π} , μ | $f = 2 \Gamma \Gamma_{\Pi} \int f$ | -45 | | | | | | | | | -35 | -45 | -35 | -40 | -40 |
| Композиционный материал | Схема укладки слоев | | × × × × | X X X X X | × × × | × × × × × × × × × | | × × × × | | | 1111111 | | | | | IA+ <u>≜</u> € |
| | Средняя плотность, г/см ³ | | 1.46 | 1.70 | 1.73 | 1.03 | 1.15 | 1.36 | 09.0 | 0.54 | 0.7 | 0.55 | 1.25 | 0.85 | 0.63 | 1.88 |
| | Содержание металличес- кой фазы, % | | 29 | 47 | 47 | 16 | 31 | 44 | 48 | 37 | | | 67 | 56 | 56 | 72 |
| | Толщи- на, мм | | 1.6 | 1.7 | 1.5 | 3.2 | 3.0 | 2.1 | 4.3 | 5.0 | 2.5 | 5.0 | 4.0 | 6.0 | 5.0 | 1.7 |
| | Mac- ca, r | | 23.11 | 30.43 | 24.74 | 32.71 | 26.91 | 28.43 | 30.53 | 41.42 | 39.23 | 48.11 | 45.89 | 60.13 | 72.11 | 64.92 |
| Металлическая фаза (волокна) | Способ изготовления | | Машинное вибровой- | локование, спекание, оксидирование, прес- | сование | | Ручная укладка не- прерывных волокон, прессование | Машинное вибровой- | локование, спекание | | Машинное вибровой- локование | Ручная укладка, прес- сование | Ручная укладка, спе- кание, прессование | Ручная укладка | | Ручная укладка, спе- кание |
| | Геометрические размеры. | $h \times a \times b$, MM | $0.3 \times 97 \times 102$ | $0.5 \times 99 \times 106$ | $0.4 \times 99.5 \times 100$ | $0.4 \times 92 \times 108$ | $0.4 \times 84 \times 93$ | $1.5 \times 92 \times 108$ | $1.5 \times 95 \times 125$ | $1.5 \times 110 \times 140$ | Св.н × 117 × 190 | $CB.yK \times 125 \times 140$ | $2.5 \times 82.7 \times 111$ | $2.5 \times 93 \times 126$ | $2.5 \times 120 \times 192$ | $2.5 \times 111 \times 183$ |
| | Mac- | са, г | 6.71 | 14.56 | 11.70 | 5.16 | 8.37 | 12.62 | 14.73 | 15.56 | | | 30.61 | 33.64 | 40.26 | 47.12 |
| | Порис- | тость, % | 71 | 75 | 62 | | | 90 | | | | | 83 | | | |
| | Диаметр волокон, | марка стали | 30 MKM | IXI8H91 | | 40—100 MKM | CT.10 | | | | | | | | | |
| | N₀ II/II | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 9 | 7 | ~ | 6 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |



Рис. 3. Машина для резки жгутов на мерные волокна (a) и установка для формования из волокон листовых заготовок (δ)





го типа (отрубном штампе), что обеспечивало получение дискретных волокон заданной длины. После мерной резки часть волокон, а после спекания — часть пористых образцов подвергали оксидированию на воздухе при температуре $300 \,^{\circ}\text{C}$ — из стали марки Ст. 10 и 450 $\,^{\circ}\text{C}$ — из стали марки 1X18H9T, с целью получения на поверхности волокон магнетита — оксида FeO · Fe₂O₃, обладающего повышенными экранировочными характеристиками за счет магнитных свойств.

Второе оксидирование пористых заготовок осуществлялось в тех же условиях, что и первое оксидирование, после их пропитки маслом для образования на поверхности волокон плотной углеродосодержащей пленки, повышающей коррозионную стойкость и механическую прочность пористого материала из Ст. 10.

Формование листовых заготовок выполняли в основном методом воздушного вибровойлокования на разработанной в ИПМ НАН Украины установке (рис. 3, δ), которая обеспечивала равномерное распределение волокон на стальной подложке, углеткани или полиэтиленовой пленке. Для получения листовых заготовок из непрерывных (в пределах габаритов изделия) волокон применяли прессование на гидравлическом прессе марки П-125 после укладки волокон в плоские прессформы прямоугольной формы.

Спекание образцов проводилось в вакууме при температуре 1200—1250 °С, в течение одного часа. После спекания образцы калибровались до заданных размеров — обрезали кромки и корректировались по высоте с помощью пресса.

Склеивание волокон с целью их консолидирования в листовую заготовку осуществлялось в процессе воздушного войлокования (осаждения) на полиэтиленовую пленку с использованием клея в аэрозольной упаковке. После высыхания склееный слой волокон легко отделялся от пленки.

Образцы композиционных материалов изготавливались путем соединения углеткани и спеченых, склееных или дискретных волокон эпоксидной смолой. Практически это выглядело таким образом: на подложку, покрытую полиэтиленовой пленкой, укладывали первый слой углеткани, промазывали его эпоксидной смолой, наносили слой одной из указанных модификаций металлических волокон, затем — второй слой углеткани, пропитанной эпоксидной смолой, а сверху покрывали полиэтиленовой пленкой и стальным листом с грузом сверху. Отвердевание композиции требовало нескольких часов выдержки (в зависимости от температуры окружающей среды и состава эпоксидной смолы). Общий вид образцов сформованных и спеченных из стальных волокон показан на рис. 4.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВОЧНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ

Энергия электромагнитных волн, попадая на экран, частично отражается и поглощается, а некоторая часть её проходит (пропускается) через экран соответственно:

$$P_{\Sigma} = P_{O} + P_{\Pi} + P_{\Pi p}, \qquad (1)$$

где P_{Σ} — падающая, P_{O} — отраженная, P_{Π} — поглощенная, $P_{\Pi p}$ — пропущенная энергия.

В общепринятой практике эффективность экранирования (К_э) определяют по логарифмической зависимости отношения енергий пропускаемого потока електромагнитных волн к падающему:

$$K_{\mathfrak{H}} = 10 \lg(P_{\Pi \mathfrak{p}}/P_{\Sigma}), \, \mathfrak{A}\mathfrak{B},$$
 (2)

или по сумме величин отражения и поглощения:

$$K_{\mathfrak{H}} = K_{\mathfrak{H}} + K_{\mathfrak{H}}, \, \mathsf{д} \mathsf{E}, \tag{3}$$

где

$$K_{\rm O} = 10 \lg(P_{\rm O}/P_{\Sigma}) = 10 \lg(P_{\Sigma} - P_{\Pi} - P_{\Pi p})/P_{\Sigma},$$
(4)

$$K_{\Pi} = 10 \lg(P_{\Pi}/P_{\Sigma}) = 10 \lg(P_{\Sigma} - P_{O} - P_{\Pi p})/P_{\Sigma}.$$
 (5)

Иногда для определения характеристик экрана в долях единицы используется выражение

$$K_{\rm O} + K_{\rm II} + K_{\rm IIp} = 1,$$
 (6)

$$K_{\rm o} = P_{\rm o}/P_{\rm s},\tag{7}$$

$$K_{\rm T} = P_{\rm T} / P_{\rm T} \,. \tag{8}$$

 $K_{\Pi} = P_{\Pi}/P_{\Sigma}$, (8) где K_{0} — коэффициент отражения, K_{Π} — коэффициент поглощения, $K_{\Pi p}$ — коэффициент пропускания:

$$K_{\Pi p} = P_{\Pi p} / P_{\Sigma}$$
, либо $K_{\Pi p} = 10 \lg(P_{\Pi p} / P_{\Sigma})$, дБ. (9)

Следует отметить, что определение величины $K_{\mathfrak{H}}$ по формуле (3) является методически достаточно сложным, так как установить точно энер-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20. № 5

гию отраженных волн, которые взаимодействуют с падающим потоком, создавая интерференцию, приводящую не только к взаимному гашению волн, но и к резонансным явлениям, трудно осуществить. Что касается определения энергии поглощеня P_{Π} , то такая методика, которая могла бы обеспечить достаточно корректные данные, требует использование специальной камеры с абсолютной электромагнитной изоляцией испытательной установки от окружающей среды. Наиболее доступно определение K_{\Im} материала по формуле (9) путем измерения его коэффициента пропускания $K_{\Pi \alpha}$.

Испытания образцов экранирующих пористых и композиционных материалов, полученных из металлических волокон, согласно технологической схеме, представленной на рис. 2, проводились в Институте химии поверхностей им. А. А. Чуйко Национальной академии наук Украины.

Эффективность экранирования оценивалась по коэффициенту пропускания $K_{\Pi p}$. Измерения выполнялись в экранированном помещении (по методу свободного пространства) при частоте 2.5 ГГц. В состав испытательного оборудования входили: генератор ЭМИ ГЗ-22 (1.8—3.0 ГГц), передающая антена П6-16, приемная антена П6-23а, измерительно-селективный усилитель У2-8.

Образцы поочередно помещали в окошке, выполненном в стенке, изолированной от ЭМИ комнаты, предварительно вкладывая каждый из них в экранирующий конверт, выполненный из сетки с размером ячейки 50 мкм и предотвращающий утечку электромагнитных волн через зазор между фланцем и металлической стенкой в месте крепления образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Установление зависимости эффективности электромагнитного экранирования пористых и композиционных материалов от диаметра и длины волокон, плотности металлической фазы, выбранного химического состава композиционного материала.

Первоначально из углеткани и стальных волокон — дискретных и непрерывных — были изготовлены 14 образцов слоистых (от трех до шести слоёв) композиционных материалов, причем стальные волокна были консолидированы в листовые заготовки различными способами, включающими воздушное войлокование, ручную укладку, а также спекание; далее следовало соединение стальных волокон с углетканью при помощи полимерного связующего — эпоксидной смолы (табл. 1). Задача поиска на этом этапе работы сводилась к выбору из всех приведенных примеров – наиболее простого по конструкции композиции и технологии получения материала, которые обеспечивали бы заданный уровень экранирующих свойств. Анализ данных, приведенных в табл. 1, дает возможность выявить один из таких вариантов, которому соответствует образец № 9. Образец выполнен в виде трехслойной композиции: два наружных слоя — углеткань, внутренний — дискретные волокна диаметром 40-100 мкм стали марки Ст. 10, осажденные методом машинного воздушного войлокования и соединенные с углетканью эпоксидной смолой. Судя по экранировочным характеристикам, также представляют интерес трехслойные композиции, в состав которых входят листовые заготовки из спеченных волокон диаметром 30 мкм стали марки 1X18Н9Т (образцы № 1, 2). Отметим, что сборка композиционного материала со спеченными металлическими волокнами (соединение с углетканью эпоксидной смолой) является более простой и легко осуществимой, чем в случае использования дискретных волокон, кроме того, доступнее становится контроль состояния структуры металлической фазы на её соответствие заданным параметрам — пористости, толщине, размеру пор, однородности и др.

Коэффициент поглощения K_{Π} определялся поочередно с обеих сторон образцов. Как видим из табл. 1, значения K_{Π} для каждой из сторон образцов с несимметричными (относительно горизонтальной плоскости, проходящей через геометрический центр образца) структурами (образцы № 3, 5, 6, 11, 12) заметно отличаются друг от друга, что представляет интерес при создании экранирующих материалов, одна из сторон которых обладает в большей мере поглощательными, а вторая — отражательными свойствами. Отражение электромагнитных волн экраном — важная составляющая экранирования в целом, от которой зависит степень обеспечения заданного уровня защиты объекта от ЭМИ. В табл. 2 приведены значения коэффициента отражения, полученные в результате испытания образцов, изготовленных из углепластика и волокон сталей аустенитного и ферритного классов, в электромагнитном поле частотой 10 ГГц. Толщина образцов составляла 1.0—10.0 мм, пористость — 70—95 %.

Наиболее высокими значениями коэффициента отражения ЭМИ обладают образцы материалов \mathbb{N} 1 — 4, 8, 9, консолидированные из волокон сталей марок Ст. 10 и 1Х18Н9Т по I варианту технологической схемы.

Коэффициенты отражения образцов № 1 — 4, 8, 9 пористостью 70—88 % составляют 95— 99 %. Коэффициенты отражения образцов № 5, 7 пористостью 92—98 % составляют 81—83 %. Наименьшие значения коэффициента отражения ЭМИ имеют образцы № 6, 10, 11 12, изготовленные по II варианту технологической схемы.

Следует иметь в виду, что сравнительно невысокие значения коэффициентов отражения образцов № 6, 10, 11 и 12 не являются признаком низких показателей их возможностей экранирования. Эти образцы, самые толстые из всех испытанных (5—10 мм), и наверняка второй компонент, отвечающий за эффективность экранирования материала — поглощение ЭМИ может быть достаточно высоким.

В дальнейшем разработка экранирующих материалов на основе углепластика и металлических волокон велась в соответствии с техническими требованиями КБ «Южное» (г. Днепропетровск) (эффективность экранирования $K_{9} < -50$ дБ), кроме этого, решалась задача создания пористых оптически- и газопроницаемых экранирующих материалов.

В табл. 3 приведены характеристики структуры и свойства экранирования образцов пористых тонколистовых материалов из спеченых стальных волокон, а также — композиционных материалов из этих же волокон и углепластика. Методика изготовления образцов состояла в следующем: формованием и спеканием из дис-

| Мо п /п | d sone | Марка | Толщина листа, | Пористость, | <i>K</i> _о при <i>f</i> = 10 ГГц | | |
|-----------|-----------------------------|---------|----------------|-------------|---|----|--|
| וו/וו פוו | <i>а</i> _в , мкм | стали | ММ | % | дБ | % | |
| 1 | 40 100 | Ст. 10 | 1.0 | 88 | -0.044 | 99 | |
| 2 | 40 100 | Ст. 10 | 3.5 | 87 | -0.088 | 98 | |
| 3 | 40 100 | Ст. 10 | 0.3 | 75 | -0.088 | 98 | |
| 4 | 30 | 1X18H9T | 0.5 | 70 | -0.044 | 99 | |
| 5 | 40 100 | Ст. 10 | 1.0 | 92 | -0.915 | 81 | |
| 6 | 40 100 | Ст. 10 | 10.0 | 98 | -2.757 | 53 | |
| 7 | 40 100 | Ст. 10 | 2.5 | 98 | -0.809 | 83 | |
| 8 | 40 100 | Ст. 10 | 1.3 | 87 | -0.177 | 96 | |
| 9 | 30 | 1X18H9T | 0.3 | 80 | -0.223 | 95 | |
| 10 | 30 | 1X18H9T | 10.0 | 99 | -6.021 | 25 | |
| 11 | 40 100 | Ст. 10 | 8.0 | 95 | -3.010 | 50 | |
| 12 | 40 100 | Ст. 10 | 5.0 | 98 | -2.441 | 57 | |

Таблица 2. Коэффициент отражения электромагнитного излучения пористыми материалами из металлических волокон

Т аблица 3. Характеристики структуры и экранировочные свойства образцов пористых и композиционных материалов, из спеченных стальных волокон

| № п/п | <i>d</i> _в , мкм | Марка стали | Пористость, % | Плотность, г/см ³ | Толщина, мм | <i>К</i> _п , дБ при <i>f</i> = 6−8 ГГц | К _{пр} , дБ при ƒ = 2.5 ГГц | | | |
|---|--------------------------------|----------------|------------------|---------------------------------|----------------|--|---|--|--|--|
| Пористые после спекания | | | | | | | | | | |
| 1 | 30 | 1X18H9T | 90 | 0.78 | 0.5 | 0.0 | -72 | | | |
| 2 | 30 | 1X18H9T | 91 | 0.72 | 0.8 | 0.0 | -75 | | | |
| 3 | 30 | 1X18H9T | 91 | 0.76 | 2.4 | 0.0 | -79 | | | |
| 4 | 40100 | Ст.10 | 87 | 1.01 | 0.5 | -0.05 | -79 | | | |
| 5 | 40100 | Ст.10 | 90 | 0.71 | 0.9 | 0.0 | -70 | | | |
| 6 | 40100 | Ст.10 | 88 | 0.83 | 1.1 | -0.4 | -74 | | | |
| Пористые после спекания и оксидирования | | | | | | | | | | |
| 7 | 30 | 1X18H9T | 90 | 0.82 | 0.5 | 0.0 | -69 | | | |
| 8 | 30 | 1X18H9T | 90 | 0.72 | 0.8 | 0.0 | -72 | | | |
| 9 | 30 | 1X18H9T | 91 | 0.69 | 1.2 | 0.0 | -78 | | | |
| 10 | 40100 | Ст.10 | 86 | 1.07 | 0.5 | 0.0 | -74 | | | |
| 11 | 40100 | Ст.10 | 89 | 0.89 | 0.8 | 0.0 | -76 | | | |
| 12 | 40100 | Ст.10 | 86 | 1.07 | 1.0 | 0.0 | -78 | | | |
| | | Композиционн | ные: углепластик | + спеченные и о | эксидированные | стальные волокна | | | | |
| 13 | 30 | 1X18H9T | _ | 1.05 | 2.0 | -0.5 | -76 | | | |
| 14 | 30 | 1X18H9T | _ | 1.08 | 2.3 | -0.5 | -90 | | | |
| 15 | 30 | 1X18H9T | _ | 1.41 | 2.5 | -0.3 | -89 | | | |
| 16 | 40100 | Ст.10 | _ | 1.52 | 2.0 | -0.4 | -89 | | | |
| 17 | 40100 | Ст.10 | _ | 2.07 | 1.6 | -0.4 | -72 | | | |
| 18 | 40100 | Ст.10 | — | 1.28 | 2.3 | -0.4 | -92 | | | |
| | | | | | | | | | | |

кретных волокон длиной 5 мм получали (по I варианту технологической схемы) листовые заготовки (6 штук) размером 85 × 330 мм, каждую из которых затем разрезали на три равные части (85 × 110 мм); первая часть — образцы № 1—6 оставались без изменения и являлись носителями базовых характристик структуры образцов, вторую часть — образцы № 7—12 — подвергали оксидированию (вариант II технологической схемы), из третьей части — образцы № 13—18 изготавливались образцы трехслойного композиционного материала (VIII вариант технологической схемы).

При сравнении эффективности экранирования всех трех групп образцов можно сделать заключение:

— все образцы, изготовленные из волокон стали 1X18Н9Т (диаметром 30 мкм) и из волокон стали Ст. 10 (диаметром 40...100 мкм), имеют приблизительно равный уровень свойств экранирования;

 наибольшее влияние на эффективность экранирования образцов оказывает толщина материала и его пористость;

 композиционные материалы из спеченных стальных волокон имеют более высокие показатели эффективности экранирования, чем пористые материалы, спеченные из этих же волокон;

— образцы пористых материалов из спеченых волокон, судя по значениям коэффициента поглощения K_{Π} , за исключением образцов № 4 и 6, экранируют ЭМИ за счет отражения, как плотные металлы, в то время как композиционные материалы экранируют ЭМИ со значительной долей его поглощения.

В табл. 4 содержатся сведения о волокнах стали марки Ст. 10 и 1Х18Н9Т, которые были консолидированы в листовые заготовки, а затем соединены с углетканью (двумя наружными слоями) эпоксидной смолой, и о экранировочных свойствах полученных таким образом материалов. Образцы изготовливали из волокон двух видов — в исходном состоянии и оксидированные (вариант VI технологической схемы).

Сопоставление эффективности экранирования образцов таких материалов свидетельствует о следующем:

• представляет интерес для дальнейшего практического использования композиционный материал из волокон стали марки 1Х18Н9Т диаметром 10 мкм и при их массовой доле в материале 4 %, значение K_9 которого равно –80 дБ (при частоте ЭМИ 2.5 ГГц);

Таблица 4. Характеристики структуры и экранировочные свойства образцов композиционных материалов на основе углепластика, содержащих стальные волокна, предварительно консолированные в листовые заготовки аэрозольным склеиванием

| No | Monyo | <i>d</i> _в , мкм | <i>l</i> _в , ММ | Массовая доля волокон, % | Состояние | Экранировочные свойства при f = 2.5 ГГц | | | |
|-----------|---------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|-----|---------------------|--|
| л⊻ п/п | стали | | | | поверхности волокон | K | V T | | |
| | | | | | | дБ | % | К _Э , дЬ | |
| 1 | 1X18H9T | 10 | 2.5 | 4 | оксидированная | | | -80 | |
| 2 | 1X18H9T | 10 | 2.5 | 8 | оксидированная | | | -81 | |
| 3 | 1X18H9T | 30 | 5 | 8 | исходная | -0.5 | 89 | -75 | |
| 4 | 1X18H9T | 30 | 5 | 13 | исходная | | | -76 | |
| 5 | 1X18H9T | 30 | 5 | 17 | исходная | -0.5 | 89 | -83 | |
| 6 | Ст.10 | 40 100 | 5 | 14 | исходная | | | -76 | |
| 7 | Ст.10 | 40 100 | 5 | 20 | оксидированная | | | -74 | |
| 8 | Ст.10 | 40 100 | 8 | 20 | оксидированная | -0.4 | 91 | -80 | |
| 9 | Ст.10 | 40 100 | 3 | 22 | оксидированная | | | -96 | |
| 10 | Ст.10 | 40 100 | 3 | 29 | исходная | | | -79 | |

Получение из металлических волокон пористых и композиционных материалов с высокой эффективностью экранирования



Таблица 5. Характеристики структуры и экранировочные свойства композиционных материалов из углепластика и дискретных стальных волокон

| № п/п | Марка стали | <i>d</i> _в , МКМ | Толщина материала, мм | Массовая доля металлических | Состояние поверхности металлических | К при <i>f</i> = | ^К о = 4 ГГц | <i>К</i> _э , дБ |
|----------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | | | волокон, % | волокон | дБ | % | |
| 1 | 1X18H9T | 10 | 1.7 | 3.5 | исходная | -0.4 | 91 | -77.5 |
| 2 | 1X18H9T | 30 | 2.6 | 8.0 | исходная | | | -68.5 |
| 3 | 1X18H9T | 30 | 2.5 | 8.0 | исходная | | | -80 |
| 4 | 1X18H9T | 30 | 3.0 | 17.0 | исходная | -0.4 | 91 | -68.5 |
| 5 | 1X18H9T | 30 | 3.0 | 21.0 | исходная | | | -69.5 |
| 6 | Ст.10 | 40 100 | 3.0 | 9.6 | исходная | | | -93 |
| 7 | Ст.10 | 40 100 | 4.0 | 11.3 | оксидирован | | | -89 |
| 8 | Ст.10 | 40 100 | 3.0 | 13.0 | оксидирован | | | -80 |
| 9 | Ст.10 | 40 100 | 3.0 | 15.0 | исходная | | | -81 |
| 10 | Ст.10 | 40 100 | 2.7 | 17.0 | оксидирован | -0.6 | 87 | -68 |
| 11 | Ст.10 | 40 100 | 2.5 | 23.0 | оксидирован | | | -90 |
| 12 | Ст.10 | 40 100 | 3.5 | 33.0 | оксидирован | | | -95 |
| 13 | Углепластик | — | 1.3 | 0 | — | -0.5 | 89 | -65.8 |

• образцы материалов с более высокими значениями K_{\Im} (образцы \mathbb{N} 2, 5, 9) содержат соответственно в 2; 4.25 и 5.5 раза больше металлической фазы, что в ряде случаев может быть недопустимо, если масса изделия является ограниченной;

• на примере образцов № 7 и 8 видно, что более длинные волокна обеспечивают более высокий уровень экранировочных свойств композиционного материала (при прочих равных условиях);

• оксидирование поверхности стальных волокон является одним из методов повышения эффективности экранирования композиционных материалов, в состав которых входят такие волокна.

В табл. 5 сведены результаты испытаний на экранирование ЭМИ образцов материалов, полученных из дискретных волокон, путем машинного вибронасева их на углеткань, пропитанную эпоксидной смолой, с последующим нанесением второго слоя углеткани, также пропитанного смолой.

Как видим из таблицы, экранировочные свойства образцов зависят от содержания металлической фазы в материале следующим образом.

1. Увеличение массовой доли металлической фазы в материале от 8 % (образец № 2) до 33 % (образец № 12) способствует повышению эффективности экранирования от -68.5 до -95 дБ;

2. Самые тонкие (диаметром 10 мкм) из всех используемых в работе стальных волокон (образец № 1) позволяют, при сравнительно малом их содержании в углепластике (массовая доля 3.5 %), получать достаточно высокие показатели экранирования ЭМИ; более высокие значения K_9 имеют образцы № 3, 8, 11 и 12, однако содержание металлической фазы в них по массе в 2.3—9.4 раза больше;

3. Углепластик (без металлических волокон) имеет более низкие показатели экранирования ЭМИ (-65.8 дБ), чем композиционные матери-

алы из углепластика, наполненного металлическими волокнами.

Структуры некоторых образцов из разработанных экранирующих материалов показаны на рис. 5.

выводы

В результате различных способов консолидирования (спекания, аэрозольного склеивания, соединения с углепластиком) дискретных и непрерывных волокон сталей аустенитного (марки 1X18H9T, диаметром 10 и 30 мкм) и ферритного (марки Ст. 10, диаметром 40—100 мкм) классов, получены высокопористые (пористостью 86— 91 %) оптически прозрачные и газопроницаемые тонколистовые (толщиной 0.5—1.0 мм, плотностью 0.71—1.01 г/см³) и плотные (композиционные: углепластик + металлические волокна, толщиной 1.6—2.5 мм, плотностью 1.05—2.07 г/см³) материалы со следующей эффективностью экранирования электромагнитного излучения:

• пористые из спеченных волокон -70...-79 дБ;

• пористые из спеченных и оксидированных волокон –

-70...-78 дБ;

 композиционные трехслойные (два наружных слоя из углеткани, внутренний — из спеченных стальных волокон, полимерное связующее — эпоксидная смола)

 композиционные материа лы аналогичной конструкции из дискретных волокон –68.5...-95 дБ;

• композиционные материалы, в которых стальные волокна предварительно консолидированы аэрозольным склеиванием -74...-96 дБ.

Полученные экранирующие материалы могут быть использованы для изготовления корпусов электронной аппаратуры для космической техники.

Стаття надійшла до редакції 27.05.14

О. В. Кириченко, В. М. Клименко, І. О. Гусарова, І. В. Шаповал, Ю. А.Шевляков

ОТРИМАННЯ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ВОЛОКОН ПОРИСТИХ І КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИСОКОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ ЕКРАНУВАННЯ

В результаті різних способів консолідації (спікання, аерозольного склеювання, з'єднання з вуглепластиком) дискретних і неперервних волокон сталей аустенітного (марки 1X18Н9Т, діаметром 10 і 30 мкм) і феритного (марки Ст. 10, діаметром 40...100 мкм) класів, отримано високопористі (пористістю 86...91 %) оптично прозорі і газопроникні тонколистові (товщиною 0.5...1.0 мм, густиною 0.71...1.01 г/см³) і щільні (композиційні: вуглепластик + металеві волокна, товщиною 1.6...2.5 мм, густиною 1.05...2.07 г/см³) матеріали з ефективністю екранування –68.5...96.0 дБ. Отримані екранувальні матеріали можуть бути використані для виготовлення корпусів електронної апаратури. O. V. Kirichenko, V. N. Klimenko, I. A. Gusarova, I. V. Shapoval, Yu. A. Shevliakov

THE PRODUCTION AND SCREENING EFFICIENCY OF POROUS AND COMPOSITION MATERIALS FROM STEEL FIBRES

High-porous (86-91%) optically transparent and gas-penetrating thin-sheet (0.5-1.0 mm, with the density from 0.71 to 1.01 g/cm³) and dense (composition: carbon fiber-reinforced plastic + metal fibres, 1.6-2.5 mm, with the density from 1.05 to 2.07 g/cm³) materials with the screening efficiency from 68.5 to 96.0 dB are produced by various ways of consolidation (sintering, aerosol agglutination, composition with carbon fiber-reinforced plastic) of discrete and continuous austenitic (1X18H9T, a diameter of 10 and 30 µm) and ferritic (St. 10, diameter from 40 to 100 µm) steel fibres. The screening materials obtained can be used to make corps of electronic devices. **АФОНІН** Валерій Васильович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук (Москва), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика магнітосфери Землі і далекого космосу, радіочастотні методи вимірювань параметрів середовища та космічне приладобудування.

БАРАНЕЦЬ Микола Володимирович — старший науковий співробітник Інституту земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль Російської академії наук (ІЗМІРАН), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика плазми, активні експерименти в космосі.

БРАЖНІК Дмитро Павлович — студент факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

Напрям науки — оброблення даних дистанційного зондування Землі.

ВОЙТА Ярослав — провідний інженер-дослідник Інституту фізики атмосфери Академії наук Республіки Чехія (Прага).

Напрям науки — фізика атмосфери Землі, космічне приладобудування, розробка та проектування малих супутників серії «Магіон».

ГНАТУШЕНКО Володимир Володимирович — завідувач кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — математичне та комп'ютерне моделювання, обробка й аналіз аерокосмічних зображень, ГІС-технології, комп'ютерна графіка.

ГУСАРОВА Ірина Олександрівна — начальник групи Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрям науки — розробка матеріалів для екранування електромагнітного випромінювання.

ДУДКІН Денис Федорович — молодший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України. Напрям науки — дослідження електричних і магнітних полів, обробка даних космічних експериментів.

ЄРОХІН Микола Сергійович — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Російської академії наук, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — фізика плазми і космічного простору.

КАВАЦ Олена Олександрівна — доцент кафедри інформаційних технологій та систем Національної металургійної академії України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — обробка та аналіз сканерних даних аерокосмічної багатоспектральної зйомки, ГІСтехнології.

КИРИЧЕНКО Олег Володимирович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — створення нових високоефективних пористих матеріалів на основі тонких металевих волокон для виготовлення фільтрів, демпферів, капілярнопористих структур, екранів для захисту від електромагнітного випромінення.

КЛИМЕНКО Валерій Миколайович — старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — створення нових високоефективних пористих матеріалів на основі металевих волокон.

КЛІМОВ Станіслав Іванович — керівник лабораторії досліджень електромагнітних випромінювань Інституту космічних досліджень Російської академії наук, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічні дослідження, космічне приладобудування.

КОЛОБРОДОВ Валентин Георгійович — завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський

політехнічний інститут», доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — теплобачення, інфрачервоної техніки, оптико-електронних систем космічного базування, метрології оптичних та оптико-електронних приладів, оптико-електронних систем спостереження.

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович — заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук. Заслужений діяч науки й техніки України, лауреат Державної премії та Премії Кабінету Міністрів України.

Напрям науки — космічні дослідження, космічне приладобудування.

КОСТОРНОВ Анатолій Григорович завідувач відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, академік НАН України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — фізика металів, проникних матеріалів, порошкової металургії, металургії металевих волокон, теплових труб.

КУДЕЛА Карел — провідний науковий співробітник Інституту експериментальної фізики Академії наук Словаччини, доктор наук, професор.

Напрям науки — ядерна фізика і фізика космічного простору, космічні промені та високоенергійні частинки.

ЛИХОЛІТ Микола Іванович — директор — Головний конструктор казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал», доктор технічних наук, доцент.

Напрям науки — лазерна та інфрачервона техніка, оптичні системи космічного базування, телевізійні, тепловізійні та теплопеленгаційні системи виявлення малоконтрастних об'єктів та систем спостереження за ними.

ЛОБАЧЕВСЬКА Оксана Василівна — завідувач відділу екоморфогенезу рослин Інституту екології Карпат Національної академії наук України, старший науковий співробітник, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — бріологія, систематика і фізіологія бріофітів.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — заступник Генерального конструктора з питань створення й експлуатації космічних апаратів, супутникових систем, контрольно-вимірювальних і інформаційно-керувальних засобів ракетно-космічного та наземного сегментів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, Заслужений машинобудівник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — ракетно-космічна техніка.

МАТИШИН Ян — інженер-дослідник Інституту експериментальної фізики Академії наук Словаччини.

Напрям науки — космічне приладобудування, високоенергійні частинки у магнітосфері Землі.

МОРОЗ Анатолій Леонтійович — старший науковий співробітник відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — технології пористих металів, проникних матеріалів, порошкової металургії, металургії металевих волокон, теплових труб.

ПОЗДНЯКОВ Дмитро Вікторович — інженер-конструктор казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал», аспірант.

Напрям науки — спеціальне приладобудування.

ПРОНЕНКО Віра Олександрівна — завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджен Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук, лауреат Премії Кабінету Міністрів України.

Напрям науки — апаратура та методика дослідження електромагнітних полів і струмів у космічній плазмі.

РУЖИН Юрій Якович — заступник директора Інституту земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль Російської академії наук (ІЗМІРАН), Троїцьк, Москва, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії Російської Федерації в галузі науки і техніки.

Напрям науки — фізика магнітосфери Землі, активні експерименти в космосі.

СКРИНСЬКА Нонна Енверівна — молодший науковий співробітник відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрям науки — матеріалознавство.

ТОМЧЕНКО Ольга Володимирівна — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі, автоматична класифікація космічних знімків.

ТЯГУР Володимир Михайлович — заступник начальника комплексу — начальник відділення казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал», кандидат технічних наук, доцент. Напрям науки — розробка та контроль оптичних систем космічного базування, інфрачервоної техніки та оптико-електронних систем спостереження.

ХОРКАВЦІВ Ярослав Дмитрович — старший науковий співробітник Інституту екології Карпат Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрям науки — цитологія.

ЧОБАНУ Мірча — керівник лабораторії магнітометрії та фізики плазми Інституту космічних наук (Бухарест), доктор технічних наук.

Напрям науки — фізика магнітосфери Землі, методи вимірювань точного магнітного поля Землі.

ШАПОВАЛ Андрій Андрійович — старший науковий співробітник відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — теплофізика пористих матеріалів, двофазного теплообміну, систем охолодження, теплових труб. ШАПОВАЛ Ірина Владленівна — науковий співробітник відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрям науки — теплофізика пористих матеріалів, двофазного теплообміну, систем охолодження, теплових труб.

ШЕВЛЯКОВ Юрій Анатолійович — старший науковий співробітник Інституту хімії поверхні ім. А. А. Чуйка Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — тестування і розробка нових нових екранувальних та радіопоглинальних матеріалів і покриттів.

ШМІЛАУЕР Ян — старший науковий співробітник Інституту фізики атмосфери Академії наук Республіки Чехія (Прага).

Напрям науки — фізика атмосфери Землі, заряджені частинки в іоносфері Землі, космічне приладобудування.