

Юрій МИРОШНІЧЕНКО¹, Олена КИРИЛЕНКО², Наталія ПАВЛОВА³

Український державний університет імені Михайла Драгоманова

e-mail: ¹yr-mir@ukr.net, ²etfa@ukr.net, ³n.yu.pavlova@udu.edu.ua;ORCID: ¹0000-0002-4321-7782, ²0000-0002-0513-5655, ³0000-0003-2140-5296**МІСІЯ «ВОЯДЖЕР»: НОВІ ВІДКРИТТЯ ЗА МЕЖАМИ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ МАГІСТРАНТІВ З ФІЗИКИ ТА АСТРОНОМІЇ**

Анотація: Місія космічних апаратів “Вояджер-1” та “Вояджер-2” надала несподівані наукові дані про структуру геліосфери й особливості міжзоряного простору. Досягнувши геліопаузи – межі, де сонячний вітер втрачає силу, – зонди зафіксували низку явищ, які мають важливе значення для сучасної астрофізики: зону надвисоких температур («стіна вогню»), підвищену концентрацію наденергійних частинок та несподіване вирівнювання міжзоряного та геліосферного магнітних полів. Отримані результати розширили уявлення про межі Сонячної системи та взаємодію сонячного й міжзоряного середовищ.

Поряд з науковою цінністю матеріали місії «Вояджер» мають значний освітній і методичний потенціал. Вони можуть бути ефективно використані у професійній підготовці магістрантів спеціальності А4 Середня освіта (А4.08 Фізика та астрономія) для формування астрономічної компетентності, розвитку дослідницьких умінь, опрацювання реальних наукових даних та інтеграції сучасних астрофізичних знань у шкільний курс фізики й астрономії.

Ключові слова: “Вояджер-1”, “Вояджер-2”, Сонячна система, геліопауза, магнітні поля, міжзоряний простір, підготовка вчителя фізики, астрономічна компетентність.

Перші сенсаційні повідомлення про те, що автоматичний зонд “Вояджер-1” (Voyager-1), запущений NASA ще в 1977 році для дослідження Юпітера і Сатурна, покинув Сонячну систему, з’явилися в березні 2013 року.

“Вояджер-1” – єдиний створений людиною об’єкт, який прославився тим, що вирвався за межі нашого “космічного дому” – Сонячної системи (рис. 1). Причому зробив це фактично двічі. Де він перебуває нині? Технічно – все ще в її межах.



Рис. 1. “Вояджер-1” – космічний апарат, який полетів найдалі від Землі. Запущений 48 років тому

Отже, де саме закінчується Сонячна система? Це питання термінології – усе залежить від того, що вважати її межею [4, 6].

У загальному розумінні Сонячна система складається з восьми планет (Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун), їх супутників, головного пояса астероїдів (між орбітами Марса і Юпітера), численних комет, а також пояса Койпера. У цьому поясі містяться переважно малі тіла, що залишилися після формування Сонячної системи, і кілька карликових планет – серед них Плутон, який понад десятиліття тому був перекласифікований із звичайної планети у карликову. Пояс Койпера за структурою схожий на пояс астероїдів, але значно перевершує його за розмірами та масою [4].

Щоб оцінити масштаби цієї частини Сонячної системи, використовують астрономічну одиницю

(а.о.), яка дорівнює середній відстані від Землі до Сонця (близько 150 млн км або 93 млн миль).

Остання планета – Нептун – віддалена від Сонця на відстань близько 30 а.о., а до пояса Койпера – 50 а.о. Додаючи ще близько 70 а.о., ми підходимо до першої умовної межі Сонячної системи – зовнішнього кордону геліосфери, яку і перетнув “Вояджер-1”.

Всі описані об’єкти – планети, пояс Койпера і простір за ним – перебувають під впливом сонячного вітру, безперервного потоку заряджених частинок (плазми), що виходить із сонячної корони [4, 11, 12]. Цей потік формує навколо системи своєрідний міхур, який витісняє міжзоряне середовище і називається геліосферою.

У міру віддалення від Сонця швидкість частинок поступово зменшується через опір міжзоряного середовища, що складається переважно з атомів водню, гелію, а також важчих елементів – наприклад, вуглецю – і пилу (приблизно 1% маси). Коли сонячний вітер різко сповільнюється й його швидкість стає меншою за швидкість звуку, формується кордон ударної хвилі (*termination shock*) [10].

“Вояджер-1” перетнув цю межу у 2004 році, а його брат-близнюк “Вояджер-2” – в 2007 році, увійшовши в область під назвою геліощит (*heliosheath*), який знаходиться перед входом до Сонячної системи (рис. 2). У просторі геліощита сонячний вітер починає взаємодіяти з міжзоряним середовищем, і їх тиск один на одного збалансовано.

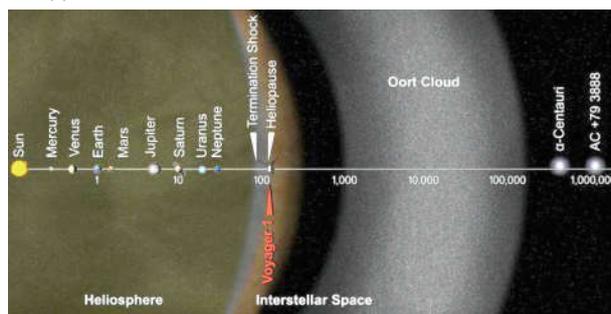


Рис. 2. Шлях “Вояджер-1”. На схемі NASA показано, що апарат подолав зони ударної хвилі та геліопаузи

У міру просування далі сила сонячного вітру все більше слабшає і в кінцевому результаті повністю поступається зовнішньому середовищу – цей умовний зовнішній кордон називають геліопаузою. Подолавши її в серпні 2012 року, "Вояджер-1" увійшов в міжзоряний простір і, якщо брати в якості кордонів межі найбільш відчутного впливу сонячного вітру – покинув Сонячну систему (рис. 3) [4, 12]. Втім, за поширеним у науковому середовищі тлумаченням, зонд ще не здолав і половини шляху до «справжніх» меж Сонячної системи.



Рис. 3. Одна з найвідоміших фотографій, зроблених "Вояджером" – *Pale Blue Dot* ("Блідо-блакитна точка", 1990 р.). Апарат отримав команду «озирнутися назад» і сфотографувати Землю

Як вчені визначили, що "Вояджер-1" подолав геліопаузу? Оскільки апарат досліджує раніше не освоєний простір, його точне місцезнаходження визначити непросто. Тому науковці орієнтуються за телеметричними даними, що передаються на Землю [11, 12]. Коли показники апарата стали вказувати на зміну навколишнього середовища, з'явилися перші припущення, що «Вояджер» наближається до міжзоряного простору (рис. 4) [12].

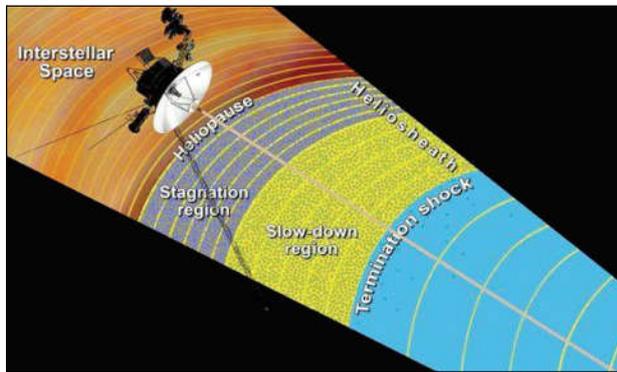


Рис. 4. Етапи виходу "Вояджера" в міжзоряний простір: ударна хвиля, геліоцит (жовтий і фіолетовий відрізки) та геліопауза (схема NASA)

Найбільш простий спосіб визначити, чи подолав апарат заповітну межу, – виміряти температуру, тиск і густину плазми, навколо зонду. Однак прилад, здатний робити такі виміри, перестав працювати на "Вояджер" ще в 1980 році. Тому, фахівцям довелося орієнтуватися на два інші інструменти: детектор космічних променів і плазмовий хвильовий прилад [4].

У той час як перший періодично фіксував зростання рівня космічних променів галактичного походження (і падіння рівня сонячних частинок), саме плазмовому хвильовому приладу вдалося переконати вчених у місцезнаходженні апарату – завдяки так зва-

ним корональним викидам маси, які відбуваються на нашій зорі.

При ударній хвилі, яка утворювалась після коронального викиду маси на Сонці, пристрій фіксував коливання електронів плазми, за допомогою яких можна було визначити її густину [10].

Фахівці змогли зрозуміти, де знаходиться "Вояджер", завдяки спалахам на Сонці (рис. 5). "Ця хвиля змушує плазму нібито дзвеніти, – у той час плазмовий хвильовий прилад дозволяє нам виміряти частоту цього дзвону, а детектор космічних променів показує, звідки прийшов цей дзвін".

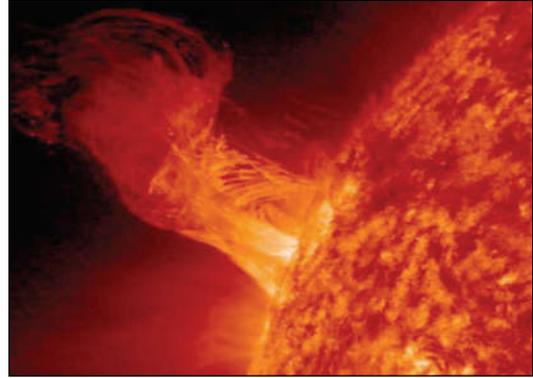


Рис. 5. Спалах на Сонці. Саме такі події допомагають фіксувати положення "Вояджера"

Чим більша густина плазми, тим більша частота коливань. Завдяки другій на рахунок "Вояджера" хвилі, в 2013 році вчені змогли дізнатися, що зонд вже більше року летить крізь плазму, густина якої в 40 разів перевищує попередні виміри.

Третя хвиля, зафіксована в березні 2014 року, показала незначні в порівнянні з попередніми зміни в густині плазми, що підтверджує перебування зонда в міжзоряному просторі (рис. 6) [11].



Рис. 6. Так виглядав центр управління "Вояджер" у 1980 році

Отже, "Вояджер-1" вибрався за межі найбільш "густонаселеної" частини Сонячної системи і зараз знаходиться в 137 астрономічних одиницях, або 20,6 млрд км від Землі. Простежити за ним можна за покликанням: <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/> (див. рис. 7) [10].

За розрахунками NASA, приблизно через 30 тисяч років він нарешті остаточно покине систему. Справа в тому, що Сонце, акумулюючи в собі переважну частину маси всієї системи – 99%, поширює свій гравітаційний вплив далеко за межі пояса Койпера і навіть геліосфери [4].

Приблизно через 300 років "Вояджер" повинен зустрітися з Хмарою Оорта – гіпотетичною (бо ніх-

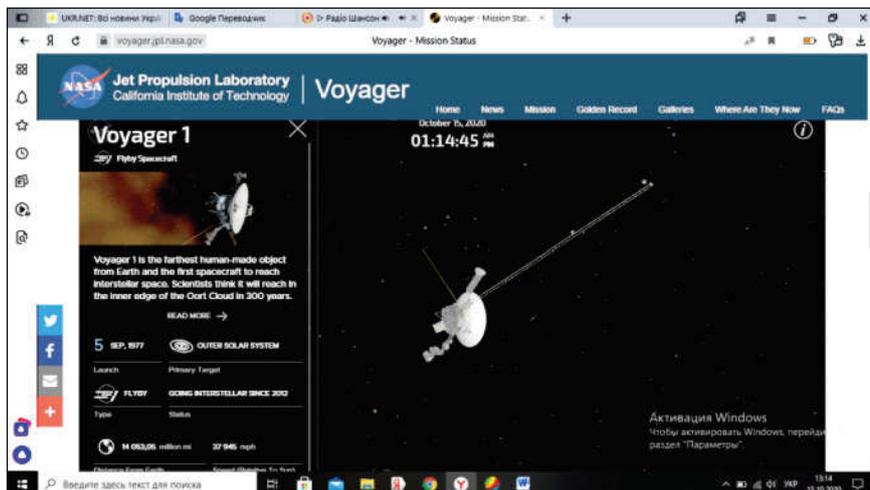


Рис. 7. Сторінка сайту NASA: <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>

то ніколи її не бачив і вчені мають лише теоретичне уявлення про неї) сферичною областю, що оперізує Сонячну систему [4, 11].

У ній знаходяться, притягаючись до нашої зорі, в основному крижані об'єкти, що складаються з води, аміаку і метану, – вони, за версією вчених, спочатку сформувалися набагато ближче до Сонця, але потім були відкинуті на задвірки Сонячної системи гравітацією планет-гігантів. Для того, щоб обернутися навколо нас, їм потрібні тисячоліття. Вважається, що деяким з цих об'єктів вдається потрапити назад, – і тоді ми помічаємо їх в формі комет [16].

Одні з недавніх прикладів – це комети C/2012 S1 (ISON) і C/2013 A1 (МакНота). Перша розпалася після проходження повз Сонце, друга пройшла поблизу Марса і покинула внутрішню область системи.

Гіпотетична межа Хмари Оорта і є остання межа Сонячної системи – межа гравітаційної могутності нашої зорі, або сфера Хілла. За межами Хмари Оорта немає нічого – тільки світло, що виходить від Сонця і подібних їй зір.

Через кілька років вчені почнуть поступово відключати прилади "Вояджера-1". Останній, як очікується, припинить працювати близько 2026 року, після чого зонд буде відправляти дані на Землю ще кілька років, а потім продовжить свою подорож в космічній тиші.

Щоб досягти меж сфери Хілла, сонячному світлу, що рухається з максимальною відомою нам швидкістю, потрібно близько двох років. До найближчої до нас зорі – Проксима Центавра – воно доходить приблизно за чотири роки. "Вояджер", якби його шлях пролягав до неї, знадобилося б понад 73 тисяч років [10].

Цікаві факти про місію "Вояджер":

- Незважаючи на назву, першим був запущений "Вояджер-2" – 20 серпня 1977 року (див. рис. 8). "Вояджер-1" стартував 5 вересня того ж року.
- Офіційна місія зондів полягала у вивченні Юпітера і Сатурна.
- Апаратом вдалося вивчити і зробити фотографії Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна і їх супутників, а також провести унікальні дослідження системи кілець Сатурна і магнітних полів планет-гігантів.
- "Вояджер-1" потім приступив до своєї "міжзоряної місії" і став самим далеким від Землі об'єктом,

який створила людина. Тепер в його завдання входить дослідження геліопаузи і середовища за межами впливу сонячного вітру. "Вояджер-2" в найближчі роки також повинен перетнути геліопаузу.

• На борту обох "Вояджер" є так звані Золоті платівки із записом звукових і відеосигналів (див. рис. 9) [10]. На них відтворено карту пульсарів з відміткою положення Сонця в Галактиці. Крім того, фахівці включили до запису все, що на їхню думку, потрібно знати представникам позаземного життя про людство: фотографії, вітання на 55 мовах, в тому числі давньогрецькій, телугу з кантонським діалектом, звуки земної природи (вулкани і землетруси, вітер і дощ, птаці і шимпанзе, людські кроки, стукіт серця і сміх), а також музичні твори – від Баха і Стравінського до Чака Беррі та Блайнд Віллі Джонсона [10].

Нині, майже через 50 років, обидва зонди усе ще працюють – і, можливо, їхнє найвеличніше відкриття сталося вже після того, як вони покинули наш космічний "двір".

Несподівані дані, передані "Вояджер-1", спантеличили науковців. NASA повідомило про виявлення своєрідної "стіни вогню", що оточує Сонячну систему (див. рис. 10) [12].

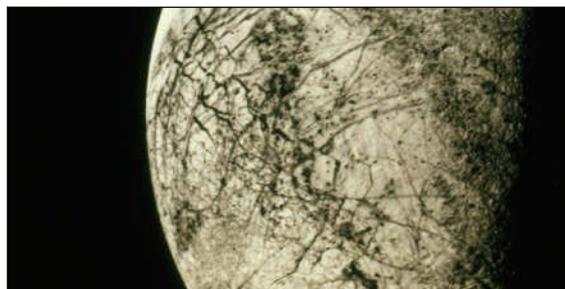


Рис. 8. Знімок Європи – одного із супутників Юпітера, зроблений "Вояджером-2"



Рис. 9. На цих пластинках міститься інформація про багатство та розмаїття людської культури

Питання щодо розмірів Сонячної системи давно цікавить науковців. Одні вважають, що вона закінчується за орбітою Нептуна, інші – десь у далекій Хмарі

Оорта, де “сплять” комети. Проте NASA використовує інше визначення: “Точною межею Сонячної системи вважають геліопаузу – область, у якій сонячний вітер втрачає силу, і починається міжзоряний простір”. Отже, геліопауза – це межа, де припиняється вплив сонячного вітру і починається міжзоряний простір, який оточує Сонячну систему і є її закінченням (див. *рис. 11*) [12].



Рис. 10. NASA зробило дивовижне відкриття / фото ua.depositphotos.com

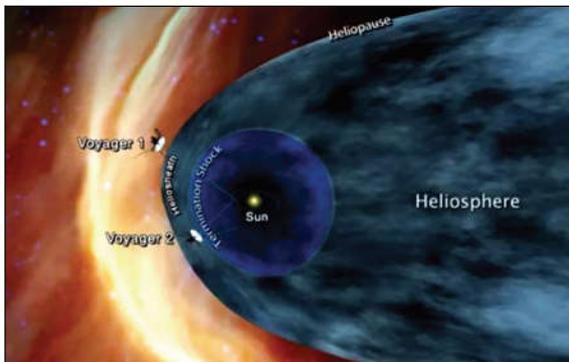


Рис. 11. Художнє зображення геліопаузи

Сонце випромінює постійний потік заряджених частинок – сонячний вітер, який формує міхур навколо Сонячної системи, що зветься геліосферою. Усередині нього ми перебуваємо під своєрідним “захистом” Сонця. За його межами починається інший світ – простір з іншим складом плазми, магнітних полів і космічного випромінювання. Саме туди – на межу між сонячним і міжзоряним середовищем – дісталися “Вояджері”.

Наша планета також постійно перебуває під впливом потоку сонячного вітру – заряджених частинок, що вилітають із Сонця. Щосекунди Сонце викидає в космос близько 1,5 мільйони тонн речовини зі швидкістю сотень кілометрів за секунду, але магнітне поле Землі захищає нас від більшості цього потоку (*рис. 12*) [12].

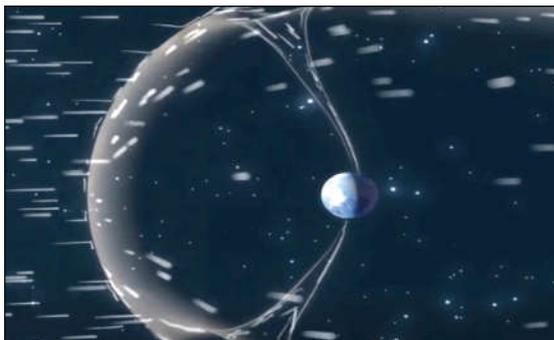


Рис. 12. Художнє зображення захисту магнітним полем Землі

Після того як зонди перетнули геліопаузу, сталося щось зовсім несподіване. *Voyager 1* першим подолав цю межу, а через шість років його наздогнав *Voyager 2*. Обидва апарати, в різний час, передали одне й те саме повідомлення: вони пройшли через область з дуже високими температурами – від 30 000 до 50 000°C. Ця область була настільки гарячою, що її назвали “стіною вогню”.

“Коли це вперше зафіксував *Voyager 1*, у вчених була тільки одна вибірка даних магнітних полів, і вони не могли з упевненістю сказати, чи спостережуване вирівнювання є типовим для всієї зовнішньої області, чи це випадковість. Спостереження магнітометра *Voyager 2* підтвердили результати *Voyager 1* і показали, що два магнітних поля дійсно вирівняні”, – заявили в NASA.

Це не означає, що зонд «загорівся» або пройшов крізь справжню піч (особливо з урахуванням того, що нещодавно NASA змогло “оживити” *Voyager 1*). Річ у тім, що ця “стіна” не є твердою або палаючою. Це – область із високою концентрацією наденергійних частинок, густина яких настільки низька, що тепло навіть не передається звичайним чином [11].

Проте явище виявилось настільки несподіваним і екстремальним, що науковці замислилися: як така структура могла залишатися непоміченою протягом десятиліть?

І ніби високої температури було недостатньо, “Вояджері” здійснили ще одне відкриття. Після проходження через “стіну” їх датчики почали фіксувати поведінку магнітного поля міжзоряного простору. І тоді сталося справжнє відкриття: зовнішнє поле виявилось вирівняним із внутрішнім магнітним полем геліосфери. А раніше вважалося, що “зовні” діють зовсім інші закони, не пов’язані з впливом Сонця [12].

Педагогічний потенціал місії “Вояджер” у підготовці магістрантів за освітньо-професійною програмою Середня освіта (фізика та астрономія) в Українському державному університеті імені Михайла Драгоманова.

Місія “Вояджер” має значний освітній потенціал у підготовці майбутніх учителів фізики та астрономії. Для магістрантів вона може слугувати прикладом ефективної інтеграції сучасних астрофізичних досліджень у професійну діяльність учителя. Аналіз телеметричних даних, фізичних моделей геліосфери, явищ плазмової взаємодії та міжзоряного середовища сприяє розвитку у студентів умінь інтерпретувати результати реальних наукових експедицій і застосовувати їх у навчальному процесі.

Дослідження місії “Вояджер” розширює зміст фахової підготовки магістрантів у таких аспектах:

- формування астрономічної компетентності, зокрема умінь аналізувати будову і межі Сонячної системи;
- удосконалення навичок роботи з науковою інформацією, включаючи телеметрію, графічні матеріали, моделі магнітних полів;
- застосування фізичних законів у контексті реальних космічних експериментів (рух по міжпланетним траєкторіям, гравітаційні маневри, взаємодія плазми);
- формування професійно-педагогічних умінь, пов’язаних із добором наукового матеріалу для його подальшого використання в шкільному курсі фізики та астрономії;

• *підготовка до STEM-орієнтованого навчання*, розвитку дослідницьких навичок і використання сучасних наукових кейсів.

Місія «Вояджер» може використовуватися у викладанні дисципліни «Теоретична астрономія». На її основі магістранти можуть розробляти демонстраційні матеріали, аналізувати моделі космічних процесів, створювати міні-проекти для учнів, опановувати підходи до популяризації науки.

Таким чином, описані у статті наукові результати місії «Вояджер» слугують не лише джерелом сучасної астрофізичної інформації, а й важливим інструментом професійної підготовки майбутніх учителів фізики, сприяючи формуванню їхньої наукової культури, критичного мислення та здатності до інтеграції складних фізичних понять у педагогічну практику.

Висновок. Місія космічних апаратів «Вояджер» стала тріумфом досліджень, підтвердивши досягнення меж Сонячної системи та надавши революційні дані про міжзоряний простір. Перетнувши геліопаузу – область, де сонячний вітер втрачає силу, – зонди «Вояджер-1» і «Вояджер-2» зафіксували явища, які кинули виклик усталеним припущенням.

Ключові відкриття «Вояджерів» стосуються двох несподіваних феноменів на кордоні нашої планетної системи. По-перше, було виявлено так звану «стіну вогню» – зону з надзвичайно високими температурами, що сягають від 30 000 до 50 000°C. Хоча ця область складається з наденергійних частинок низької густини, сам факт існування такої несподіваної та потужної структури на межі геліосфери вимагає перегляду моделей взаємодії сонячного та міжзоряного середовищ. По-друге, апарати зафіксували несподівану поведінку магнітного поля: зовнішнє міжзоряне поле виявилось вивірним із внутрішнім полем геліосфери. Це суперечить попереднім науковим припущенням, згідно з якими за межами геліосфери мали б діяти зовсім інші фізичні закономірності, не пов'язані з впливом Сонця.

Таким чином, місія «Вояджер» надала критично важливі емпіричні докази, які відкривають нову еру для наукових дискусій щодо визначення справжніх меж Сонячної системи та природи фізичних процесів на цьому кордоні. Отримані дані є безцінними для розуміння того, як наша планетарна система взаємодіє з ширшим космічним середовищем.

Отримані та узагальнені у статті матеріали мають не лише наукове, а й суттєве педагогічне значення для підготовки магістрантів спеціальності А4 Середня освіта (А4.08 Фізика та астрономія). Аналіз місії «Вояджер» сприяє розвитку здатності майбутніх учителів працювати з сучасними даними астрофізики, інтегрувати результати реальних досліджень у навчальний процес, формувати в учнів науковий світогляд і мотивацію до вивчення природничих дисциплін. Використання матеріалів космічних місій у професійній підготовці забезпечує відповідність освітнього процесу вимогам НУШ та сучасним тенденціям наукової освіти.

Список використаних джерел:

1. «Астроосвіта» (веб-сайт астрономічної освіти): веб-сайт. URL: <http://astroosvita.kiev.ua/> (дата звернення: 25.10.2025).

2. «Астрономічна обсерваторія» (веб-сайт Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка). URL: <http://www.observ.univ.kiev.ua> (дата звернення: 20.10.2025).
3. «Астрономія для всіх» (персональний сайт Ю.Б. Миросніченка). URL: <http://yuriy-myroshnichenko.edukit.kiev.ua/> (дата звернення: 23.09.2025).
4. «NASA Astronomical News. Space News»: website. URL: <http://www.nasa.gov/> (date of application: 23.09.2025).
5. «Астрофізика високих енергій» (веб-сайт відділу Астрофізики високих енергій). URL: <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php/> (дата звернення: 23.09.2025).
6. The European Space Agency (ESA): website. URL: <http://www.esa.int/rosetta> (date of application: 10.09.2025).
7. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): website. URL: <http://www.dlr.de> (datum der Bewerbung: 11.09.2025).
8. «Кафедра астрономії та фізики космосу» (веб-сайт кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка). URL: http://space.univ.kiev.ua/viewpage.php?page_id=1/ (дата звернення: 20.10.2025).
9. «Київський планетарій» (веб-сайт Київського планетарію). URL: <http://www.kievplanet.org.ua/> (дата звернення: 20.09.2025).
10. «Наукова бібліотека» (веб-сайт Наукової бібліотеки). URL: <http://www.library.ukma.kiev.ua/> (дата звернення: 23.09.2025).
11. Вояджер-1. Веб-сайт «Вікіпедія». URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D1%8F%D0%B4%D0%B6%D0%B5%D1%80-1> (дата звернення: 22.10.2025).
12. Web page of the ASTROPHYSICAL JOURNAL «Forbes» URL: <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/03/24/ask-ethan-if-dark-matter-is-everywhere-why-havent-we-detected-it-in-our-solar-system/?sh=763945c5352f> (date of application: 11.09.2025).
13. «DominionAstrophysicalObservatory»: website. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2023/11/231120170937.htm> (date of application: 19.09.2025).
14. Muinonen K. Coherent backscattering by Solar system dust particles. In: IAU Symposium No. 160, *Asteroids, Comets, Meteors 2013*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. 2014. P. 271–296.
15. Muinonen K. Coherent backscattering of light by complex random media of spherical scatterers: Numerical solution. *Waves in Random Media*. 2004. № 14 (3). P. 365–388.
16. Asteroid photometric and polarimetric phase effect / Muinonen K. at all. In: *Asteroids III* (W. Bottke et al. eds.). Univ. of Arizona, Tucson. 2022. P. 123–138.
17. Polarization and brightness opposition effects for the E-type Asteroid 64 Angelina / Rosenbush V.K. at all. *Icarus*. 2005. V. 178. P. 222–234.

Yuriy MYROSHNICHENKO, Olena KYRYLENKO, Nataliia PAVLOVA

Dragomanov Ukrainian State University

THE VOYAGER MISSION: NEW DISCOVERIES BEYOND THE SOLAR SYSTEM AND THEIR USE IN THE PROFESSIONAL TRAINING OF MASTER'S STUDENTS IN PHYSICS AND ASTRONOMY

Abstract. The Voyager 1 and Voyager 2 spacecraft missions have provided unexpected scientific data on the structure of the heliosphere and the characteristics of interstellar space. After reaching the heliopause – the boundary where the solar wind loses its strength – the probes recorded several phenomena of great significance

for modern astrophysics, including a region of extremely high temperatures (“the wall of fire”), an increased concentration of high-energy particles, and an unexpected alignment between the interstellar and heliospheric magnetic fields. These findings broaden current understanding of the boundaries of the Solar System and the interaction between solar and interstellar media.

Alongside their scientific value, the materials obtained from the Voyager mission possess considerable educational and methodological potential. They can be effectively integrated into the professional training of master’s students majoring in Secondary Education (Physics and Astronomy) to develop astronomical competence, enhance research skills, work with real scientific data, and incorporate contemporary astrophysical knowledge into the school curriculum of physics and astronomy.

Key words: Voyager 1, Voyager 2, Solar System, heliopause, magnetic fields, interstellar space, teacher training, astronomical competence.

References:

1. «Astroosvita» (veb-sajt astronomichnoyi osvity). URL: <http://astroosvita.kiev.ua/>
2. «Astronomichna observatoriya» (veb-sajt Astronomichnoyi observatoriyi Kyuyivs`kogo nacional`nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka). URL: <http://www.observ.univ.kiev.ua>
3. «Astronomiya dlya vsix» (personal`nyj sayt Yu.B. Myroshnichenka. URL: <http://yuriy-myroshnichenko.edukit.kiev.ua/>
4. «NASA Astronomical News. Space News»: website. URL: <http://www.nasa.gov/>
5. «Astrofizyka vysokyx energyj» (veb-sajt viddilu Astrofizyky vysokyx energij). URL: <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php/>
6. The European Space Agency (ESA): website. URL: <http://www.esa.int/rosetta>
7. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): website. URL: <http://www.dlr.de>
8. «Kafedra astronomiyi ta fizyky kosmosu» (veb-sajt kafedry astronomiyi ta fizyky kosmosu fizychnogo fakul`tetu Kyuyivs`kogo nacional`nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka). URL: http://space.univ.kiev.ua/viewpage.php?page_id=1/
9. «Kyuyivs`kyj planetarij» (veb-sajt Kyuyivs`kogo planetariyu). URL: <http://www.kievplanet.org.ua/>
10. «Naukova biblioteka» (veb-sajt Naukovoyi biblioteky). URL: <http://www.library.ukma.kiev.ua/>
11. Voyadzher-1. Veb-sajt «Vikipediya». URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D1%8F%D0%B4%D0%B6%D0%B5%D1%80-1>
12. Web-page of the ASTROPHYSICAL JOURNAL "Forbes" <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/03/24/ask-ethan-if-dark-matter-is-everywhere-why-havent-we-detected-it-in-our-solar-system/?sh=763945c5352f>
13. «Dominion Astrophysical Observatory»: website. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2023/11/231120170937.htm>
14. Muinonen K. Coherent backscattering by Solar system dust particles. In: IAU Symposium No. 160, *Asteroids, Comets, Meteors 2013*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. 2014. P. 271–296.
15. Muinonen K. Coherent backscattering of light by complex random media of spherical scatterers: Numerical solution. *Waves in Random Media*. 2004. № 14 (3). P. 365–388.
16. Asteroid photometric and polarimetric phase effect / Muinonen K. at all. In: *Asteroids III* (W. Bottke et al. eds.). Univ. of Arizona, Tucson. 2002. P. 123–138.
17. Polarization and brightness opposition effects for the E-type Asteroid 64 Angelina / Rosenbush V.K. at all. *Icarus*. 2005. V. 178. P. 222-234.

Отримано: 2.11.2025

УДК 378.147:004:37.026

DOI: 10.32626/2307-4507.2025-31.147-151

Ростислав МОЦИК¹, Юрій СМОРЖЕВСЬКИЙ², Ірина ГОРДІЄНКО³

^{1,2}Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

³Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка

e-mail: ¹motsyk@kpnpu.edu.ua, ²smorzhevskiy@kpnpu.edu.ua, ³hordijenko@dspu.edu.ua;

ORCID: ¹0000-0003-0947-3579, ²0000-0001-9832-3390, ³0000-0001-6182-4968

STEM-СЕРЕДОВИЩЕ ЯК ДЕТЕРМІНАНТА ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНО-ОСОБИСТІСНИХ ЯКОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ВЧИТЕЛІВ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Анотація. У статті теоретично обґрунтовано роль STEM-середовища як ключового детермінанта (визначального фактора) у підготовці майбутніх вчителів фізико-технологічних дисциплін. Проаналізовано, що інтегрований та проєктно-орієнтований STEM-підхід є сучасною відповіддю на виклики цифрової трансформації освіти, яка вимагає від педагогів формування компетентностей XXI століття – критичного мислення, креативності, навичок міждисциплінарної комунікації та високої цифрової грамотності. Показано, що організоване STEM-середовище (включно з м'якоорієнтованими інструментами Google Workspace, Microsoft 365, Canvas for Education) сприяє реалізації принципів активного навчання (active learning) та персоналізації, перетворюючи здобувача освіти з об'єкта на суб'єкта навчання. Визначено, що систематичне залучення студентів до інженерних та дослідницьких проєктів у цьому середовищі безпосередньо формує такі професійно-особистісні якості, як професійна самостійність, інноваційність, гнучкість та стресостійкість, що є критичними для «Вчителя 4.0». Обґрунтовано педагогічні, організаційні та технічні умови, необхідні для ефективної інтеграції STEM-середовища у навчальний процес ЗВО. Зроблено висновок, що STEM-середовище є системоутворювальним чинником у розвитку цифрової компетентності учасників освітнього процесу та забезпеченні якісної підготовки педагогів.

Ключові слова: STEM-середовище, цифрова трансформація освіти, професійно-особистісні якості, вчителі фізико-технологічних дисциплін, компетентності XXI століття, проєктне навчання, цифрова компетентність.