

Є. Л. Кордюм

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України

## Перспективи розвитку космічної та гравітаційної біології в Україні

---

Висвітлюються надбання українських вчених в галузі космічної та гравітаційної біології. Розглядаються концепція та основні напрямки досліджень в наступні 2003—2007 роки.

---

Дослідження з космічної біології та медицини продовжують займати перше місце в космічних програмах різних країн світу через свою спрямованість на одержання принципово нових наукових знань відносно впливу факторів космічного польоту на живі істоти різного рівня їхньої організації. Такі знання вкрай необхідні для рішення прикладних завдань медичного забезпечення пілотованих космічних польотів, створення контрольованих екологічних систем життєзабезпечення космонавтів та прогнозування їхньої надійності в тривалих космічних польотах, при відвіданні Місяця та Марса. Космонавтика також відкрила неочікувані можливості використання унікальних умов космічного польоту для рішення фундаментальних проблем біології, зокрема для з'ясування ролі сили тяжіння у функціонуванні біосфери Землі. Оскільки на Землі послабити силу тяжіння на тривалий час неможливо, вивчення її біологічної ролі та становлення «гравітаційної біології» розпочалися лише в космічну еру. Космічні кораблі стали експериментальними лабораторіями, де завдяки застосуванню бортової центрифуги можливо створити різні величини сили тяжіння та, нижчі за 1g.

В Україні космічні експерименти з бактеріями, водоростями, вищими рослинами, культурами органів та тканин, запропоновані і підготовлені в наукових установах Національної академії наук України, почалися у 1974 р. та здійснювалися на біосупутниках серії «Космос», космічних кораблях та орбітальних станціях «Салют» та «Мир» (спільно з Інститутом медико-біологічних проблем та НПО «Енергія»). Хронологію польотних експериментів та їхні результати висвітлено в роботах [1, 5]. У 1997 р. на борту космічного корабля «Колумбія» з участю українського космонавта Л. К. Каденюка був проведений спільний українсько-американський експеримент з метою вивчення впливу мікрогравітації

на ріст та розвиток вищих рослин [2, 3]. З 1993 р. дослідження в галузі космічної біології та медицини, в яких беруть участь 27 установ Національної академії наук України, Академії медичних наук України та університети, ведуться за Національною космічною програмою України і фінансуються Національним космічним агентством України.

Найважливішими здобутками українських вчених є відкриття гравічутливості рослинної клітини та встановлення загальних закономірностей впливу мікрогравітації на живі істоти на клітинному та молекулярному рівнях [1—5]. На основі аналізу даних космічних та наземних (кліноштатування та гравістимуляція) експериментів отримано ряд важливих результатів. 1. Виявлено наявність ендогенних факторів морфогенезу мохів, роль яких маскується гравітацією та світлом. 2. Встановлено, що плагіотропний ріст рослинних клітин з верхівковим ростом в гравітаційному полі забезпечується формуванням апікально-базального градієнта іонів кальцію та актинового цитоскелета. 3. Запропоновано нову модель сприйняття гравітаційного стимулу статоцитами (гравірецепторні клітини) кореневого чохла, згідно з якою ядро статоцита є посередником в передачі сигналу від сенсорів гравітації — амілопластів, що виконують статолітну функцію, до зони розтягу, де відбувається заключна фаза гравітропічної реакції, тобто згин органу — кореня або стебла.

Сьогодні Україна є одним із світових центрів комплексних досліджень в галузі клітинної біології. Прийняття України в квітні 2000 р. до Міжнародної робочої групи з космічної біології та медицини (International Space Life Sciences Working Group) є належною оцінкою її внеску в світову науку та визнанням її як гідного партнера у розвитку космічної біології та медицини в XXI столітті. Програма з космічної біології та медицини, яка планується



Основні напрямки досліджень гравічутливості організмів

на 2003—2007 роки, спрямована на експериментальну перевірку висунутих українськими вченими оригінальних концепцій та гіпотез в цих галузях з урахуванням сучасних тенденцій світової науки, винайдення нових методологічних підходів до постановки наземних та космічних експериментів та обробки експериментального матеріалу, розв'язання певних прикладних завдань та створення нового покоління космічного обладнання. Визначено такі основні напрямки досліджень: 1) біологія клітини в умовах зміненої гравітації; 2) біологія розвитку та тривалість життя в умовах зміненої гравітації; 3) функціональний стан та динаміка популяцій бактерій, взаємовідношення патогенних організмів та вірусів з рослинами, тваринами та людиною в умовах зміненої гравітації, формування симбіотичних систем тощо; 4) компенсаторні біологічні можливості магнітного поля при відсутності гравітації та їхня природа, використання магнітних полів різної напруги для досліджень механізмів гравітропізму рослин; 5) пре-біотичний синтез; 6) біотехнологія; 7) космічна медицина. Напрямок з біології клітини в умовах мікрогравітації включає широке коло завдань (рисунок), спрямованих на пізнання клітинних та молекулярних механізмів гравічутливості організмів. Для експериментальної

перевірки гіпотези гравітаційної декомпенсації, що визначає як первинне місце дії мікрогравітації цитоплазматичну мембрану клітини, від стану якої значною мірою залежить нормальне функціонування організму, плануються дослідження структур, фізико-хімічних та функціональних властивостей біологічних мембран з використанням модельних систем — ліпосом та препаратів цитоплазматичної мембрани, ендоплазматичного ретикулума, пресинаптичних мембран тощо. Передбачається вивчення проліферативної активності та регуляції клітинного циклу в умовах зміненої гравітації, оскільки ці процеси лежать в основі росту та розвитку організмів, проте наявні літературні дані дуже обмежені та суперечливі. Особливий інтерес викликає дія гравітації на молекулярну організацію та динаміку перебудов актинових та тубулінових елементів цитоскелету, що виконує функції опорно-рухового апарату клітини, в процесах ділення, росту та диференціювання клітин, безпосередньо або через певні метаболічні шляхи, для з'ясування чого проводитимуться дослідження структури, топографії, динаміки та біохімічного складу цитоскелету в клітинах різного типу в умовах зміненої гравітації. Планується вивчення функціонування сигнальних систем в клітинах, зокрема метаболізму

кальцію як вторинного месенджера. Після завершення проекту «Геном людини» на провідні позиції вийшло вивчення «функціонального геному», чи протеому, що дозволяє пов'язати структуру генів з їхньою функцією, пізнавати механізми регуляції диференціальної експресії білків та їхніх посттрансляційних модифікацій та дослідити взаємодії білків, їхніх окремих структурних та функціональних доменів. Вивчення в цьому напрямку запрограмованої смерті клітин, чи апоптозу, в умовах зміненої гравітації є новим підходом до виявлення гравічутливих та гравізалежних процесів у клітині. Для пошуку шляхів запобігання порушень хронобіологічного стану космонавтів пропонується дослідити вплив мікрогравітації та циклічного освітлення на деякі ритмологічні характеристики організму людини із застосуванням культури лімфоцитів як адекватної клітинної моделі. Дослідження морфологічних та функціональних особливостей нервової, ендокринної та імунної систем на клітинному та молекулярному рівнях в умовах зміненої гравітації спрямовані на виявлення можливих змін у функціонуванні цих систем в таких умовах, що сприятиме розумінню небажаних змін здоров'я космонавтів у тривалих космічних польотах. Плануються комплексні дослідження феномену втрати кісткової маси в умовах гіпокінезії та космічному польоті, що є ситуацією максимального дефіциту механічного навантаження при дії малих доз радіації та адекватною моделлю для з'ясування закономірностей розвитку остеопорозу. В основі виникнення остеопоротичних змін лежать структурні та метаболічні перебудови в клітинах та міжклітинній речовині кісткової тканини, які на даний час вивчені мало. Виявлені зміни ростових та морфогенетичних процесів в кістках в умовах мікрогравітації [7] відображають один з механізмів розвитку остеопорозу при зниженні опорного навантаження на скелет. Як відомо, остеопороз — системне захворювання скелета, що призводить до підвищення ризику переломів, сьогодні є одним з основних захворювань, обумовлених малорухливим способом життя (гіпокінезія) і несприятливими екологічними факторами, та розглядається як «хвороба цивілізації».

Одними з основних завдань досліджень з біології розвитку організмів в умовах зміненої гравітації є визначення характеру детермінації процесів онтогенезу рослин в умовах мікрогравітації та інтенсивності фотосинтезу — процесу, безпосередньо пов'язаного з продуктивністю рослин; зокрема встановлення зв'язку між інтенсивністю та спектральним складом світла та ефективністю фотосинтетичного перетворення енергії в умовах мікрогравітації, що необхідно для створення технологій космічного рослинництва. Дослідження структурно-

функціональної організації генеративних органів вищих рослин на послідовних етапах їхнього формування, зокрема регуляції процесу утворення насіння та плодів в умовах зміненої гравітації, а також органів вегетативного розмноження (цибулини, бульби та туріони), спрямовані на з'ясування можливостей вегетативного та насінневого розмноження рослин, сільськогосподарських та дикорослих; при відсутності сили тяжіння та на розробку рекомендацій для їхнього вирощування в космічних оранжереях. Продовжуватиметься вивчення ростових рухів та морфогенезу мохів в умовах зміненої гравітації для розуміння природи взаємозв'язків фото- і гравітропізмів у ростових та формотворчих процесах мохів. Значна увага приділятиметься також дослідженням структури органів та фізіологобіохімічних процесів у тварин в умовах гіпергравітації, зокрема дослідженню співвідношення інтенсивності газообміну, терморегуляції та активності ключових антиоксидантних ферментів, експресії стрес-білків та апоптозу у мишей та щурів різного віку під впливом хронічних сеансів гіпергравітації, та пошукам засобів усунення негативних наслідків гіпергравітаційних навантажень за допомогою інгібіторів апоптозу та індукторів шаперонів.

На основі концепції щодо змін імунітету живих істот та агресивності патогенних організмів в умовах мікрогравітації [6] досліджуватимуться взаємодіювання рослини-хазяїна з патогенними бактеріями в умовах зміненої гравітації, аналізуватимуться рівень індукції помірному вірусу лізогенної культури ціанобактерій, фізіологічні та молекулярно-біологічні властивості вірусів, індуктованих в умовах зміненої гравітації як основи для рекомендації цієї уніфікованої модельної системи для вивчення впливу мікрогравітації на індукції ДНК-геномних вірусів. Оскільки важливим для космічного рослинництва є з'ясування особливостей впливу корисних для рослин ендofітних бактерій, в тому числі генетично модифікованих, на розвиток рослин в умовах космічного польоту у порівнянні з наземним контролем, планується вивчення молекулярно-генетичних процесів (утворення транспозонних мутантів, перебудови ДНК, експресія генів, що «мовчать»), які відбуватимуться у модельних бактерій в умовах зміненої гравітації. Одержані результати створять основу для розробки моделі, за допомогою якої можна буде прогнозувати утворення та поширення модифікованих бактерій в умовах мікрогравітації. Передбачається також вивчення особливостей репродукції аденовірусів в епітеліальних та лімфобластоїдних клітинах різної чутливості в умовах зміненої гравітації. Дослідження впливу факторів космічного польоту на біологічні властивості резидентної мікрофлори людини *in vitro* та *in vivo* мають на меті оцінку здатності бактерій

до реалізації потенційних патогенних властивостей в екстремальних умовах.

У напрямку «Біотехнологія» плануються наступні завдання: 1) удосконалення сорбційних методів детоксикації та корекції гомеостазу організмів космонавтів під час польоту (профілактика, лікування) та після повернення на Землю (лікування, реабілітація); 2) дослідження життєдіяльності та метаболізму олігохет (червоний каліфорнійський черв'як) в умовах зміненої гравітації з метою розробки рекомендацій для його використання у ланці утилізації відходів в екологічних системах життєзабезпечення космонавтів; 3) розробка конструктивних підходів для керування фізичними, хімічними та біохімічними характеристиками заміників ґрунту для формування закритих біосистем та їхнього використання для вирощування рослин в космічному польоті; 4) створення технологій «зеленого конвеєра» для пілотованих космічних апаратів, який має бути необхідною ланкою системи життєзабезпечення космонавтів, оскільки тривале перебування людини у замкненому просторі є додатковим психологічним навантаженням, усунення якого потребує наявності зеленого куточка із звичними рослинами, які до того ж можна використовувати в їжу як смакові та вітамінні добавки.

Основна увага за напрямком «Космічна медицина» приділятиметься дослідженням ролі ендотеліальної дисфункції у порушенні стану мікроциркуляції крові в умовах космічного польоту та впливу факторів космічного польоту на процеси утворення та руйнування тромбів у крові людини, а також методам оптимізації функціонування імунної та антиоксидантної систем людини в умовах космічного польоту; обґрунтуванню та математичній розробці алгоритму побудови психофізіологічної моделі для оцінки поточної працездатності людини та створенню моніторингової системи для реалізації цього алгоритму.

Розділ «Приладобудування» включає розробку та створення нового космічного обладнання для проведення біологічних та біотехнологічних експериментів на борту Міжнародної космічної станції, зокрема: 1) установка «Мікроколонка» для проведення в умовах космічного польоту оцінки сорбційної здатності вуглецевих афінних матеріалів по відношенню до антитіл, інсуліну, вільного гемоглобіну та ліпопротеїдів, при контакті з біологічними рідкими середовищами, такими як сироватка та плазма крові, кровозамінники та модельні розчини в мікроколоночному проточному експерименті «Біосорбент» з метою створення біоспецифічних вуглецевих сорбентів та їхнього використання в медицині та біотехнології на Землі та в космічному польоті; 2) система «Біолабораторія»

для проведення космічних експериментів з культурами органів, тканин та клітин рослин, тварин та людини, бактеріями, проростками рослин, найпростішими та комахами. Система забезпечує контрольовані температурні умови, створення штучної гравітації за допомогою центрифуги (контроль), спостереження за об'єктами за допомогою мікроскопа та їхня відеозйомка, фіксацію експериментального матеріалу та збереження фіксованих та живих об'єктів у відповідних умовах після закінчення експерименту до повернення їх на Землю та 3) «Оранжерея» для проведення космічних біологічних та біотехнологічних експериментів з нижчими та вищими рослинами в контрольованих умовах та вирощування зеленої маси овочевих культур, які швидко ростуть, для раціону космонавтів. Принципи побудови такої багатоцільової оранжереї змінної геометрії наступні: а) модульність функціональних блоків, б) уніфікація основних елементів та в) можливість оперативного формування різних технологічних конфігурацій. Передбачається проведення фенологічних спостережень та моніторинг основних фізіологічних процесів у рослин під час росту в умовах космічного польоту.

Програма виконуватиметься у співробітництві з Росією, США, Францією, Німеччиною та, можливо, іншими країнами, які входять до Європейського космічного агентства.

1. Кордюм Є. Л. Космічна біологія: сучасний стан в світі та Україні // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3-4.—С. 5—15.
2. Кордюм Є. Л. Дослідження у космосі — для земних потреб // Вісник НАН України.—2000.—№ 8.—С. 40—43.
3. Кордюм Є. Л. Космічна біологія і медицина в Україні: концепції та експериментальні дані. Космічні дослідження в Україні, 2000—2002, НКАУ, Київ, 2002, С. 55—66.
4. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // International Review of Cytology.—1997.—171.—P. 1—78.
5. Kordyum E. L. Space biology and medicine in Ukraine. Space Research in Ukraine, 1998—2000, NSAU, Kyiv, 2001, P. 42—51.
6. Leach J., Ryba-White M., Sun Q., et al. Plants, plant pathogens, and microgravity — a deadly trio // Gravitational Space Biology Bulletin.—2001.—14, № 2.—P. 15—23.
7. Rodionova N. V., Shevel I. M., Oganov V. S. Bone ultrastructural changes in Bion-11 Rhesus monkeys // Journal of Gravitational Physiology.—2000.—7.—№ 1.—P. 157—159.

#### PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF SPACE AND GRAVITATIONAL BIOLOGY IN UKRAINE

E. L. Kordyum

The achievements of Ukrainian scientists in the field of space and gravitational biology as well as the concept and main directions of future research in 2003—2007 are considered.