

МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ
І НАУКИ
УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Л. Ф. ЧОРНОГОР

ФІЗИКА БІОСФЕРИ

*Рекомендовано вченою радою
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
як підручник*

Харків

2022

УДК 502.2(075.8)
ББК 20.1я73
Ч 75

Рецензенти: академік НАН України Л. М. Литвиненко (Радіоастрономічний інститут НАН України), доктор фіз.-мат. наук, професор В. М. Івченко (Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, кафедра астрономії та фізики космосу).

Ч 75 **ЧОРНОГОР Л. Ф. Фізика біосфери:** Підручник. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. – 140 с.

Викладено загальні відомості про біосферу на всіх структурних рівнях, про процеси в світі живої природи, взаємодію живої та неживої матерії, нетрадиційні явища в біосфері та ін. Увагу також приділено загадковим та таємничим явищам у біосфері.

Для студентів молодших курсів університетів, учнів 10 – 11 класів навчальних закладів нового типу (лицейів, гімназій, колегіумів) та середніх шкіл, широкого кола читачів.

УДК 502.2(075.8)

ББК 20.1я73

4 іл., 17 табл., 5 бібл.

Ч 75 **ЧЕРНОГОР Л. Ф. Физика биосферы:** Учебник. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2022. – 140 с.

Изложены общие сведения о биосфере на всех структурных уровнях, о процессах в мире живой природы, взаимодействии живой и неживой материи, нетрадиционные явления в биосфере и др. Определенное внимание уделяется загадочным и таинственным явлениям в биосфере.

Для студентов младших курсов университетов, учащихся 10 – 11 классов учебных заведений нового типа (лицеев, гимназий, коллегіумов) и средних школ, широкого круга читателей.

УДК 502.2(075.8)

ББК 20.1я73

4 илл., 17 табл., 5 библи.

Ч 75

CHERNOGOR L. F. Biosphere Physics. Textbook. – Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2022. – 140 pp.

This book provides general information on the biosphere on each structural level, on processes in the animal, plant and mineral kingdoms, on coupling between an animate and inanimate matter, non-traditional biosphere phenomena, etc. Such enigmatic and mysterious biosphere phenomena are also discussed

The textbook is intended for students in the first two years of university, for students in new types of educational institution (lyceums, junior college, etc.) and secondary schools, and the general public.

УДК 502.2(075.8)

ББК 20.1я73

4 Figures, 17 Tables, 5 References.

ISBN

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2022

© Л. Ф. Черногор, 2022

© Оформлення І. М. Дончик, Л. Ф. Черногор, 2022



ЗМІСТ

ДО ЧИТАЧА	9
ПЕРЕДМОВА НАУКОВОГО РЕДАКТОРА	14
ВСТУП	20
В.1. Особливості курсу	21
В.2. Цілі й завдання курсу	22
В.3. Структура курсу	23
В.4. Питання та вправи для самостійної роботи	25
1. Загальні відомості про біосферу	26
1.1. Ознаки живої матерії	27
1.2. Зв'язок живої та неживої матерії	27
1.3. Рівні організації живої матерії	29
1.4. Вчення Ч. Дарвіна	30
2. Виникнення та існування живої матерії	32
2.1. Еволюція Всесвіту та живої матерії на Землі	32
2.2. Умови життя	33
2.3. Екстремальні умови життя	36
2.4. Біологічні ритми	40
2.5. Геліобіологія та вчення О. Л. Чижевського	41
2.6. Поняття про космізм	43
2.7. Антропний принцип	45
3. Основні закони еволюції біосфери	46
3.1. Вчення про біосферу	47
3.2. Вчення про ноосферу	51
3.3. Загальні відомості про закони еволюції біосфери	52
3.4. Найпростіший закон зростання чисельності організмів	53

3.5. Квадратичний закон росту чисельності організмів	55
3.6. Логістичний закон	57
3.7. Закон конкурентного витіснення	59
3.8. Закон взаємодії популяцій	60
3.9. Напрямки вдосконалювання законів математичної біології та біосфери	63
4. Розміри та маси живих організмів	64
4.1. Загальні відомості	64
4.2. Світ рослин	64
4.3. Світ тварин	67
5. Швидкості та прискорення живих організмів	70
5.1. Загальні відомості	70
5.2. Швидкість, прискорення та кінетична енергія	70
5.3. Рух у воді	73
5.4. Рух у повітрі	75
5.5. Швидкість бігу	81
6. Енергія та потужність живих організмів	82
6.1. Загальні відомості	82
6.2. Споживана енергія та потужність	82
6.3. Теплова енергія	83
6.4. Механічна потужність	83
6.5. Потужність теплового випромінювання	90
6.6. Потужність випаровування	92
6.7. Баланс енергій людини	93
7. Електромагнітні явища в живій природі	95
7.1. Загальні відомості	95
7.2. Біоелектрика	96
7.3. Біоструми та біопотенціали	97
7.4. Біомагнетизм	98
7.5. Світіння біооб'єктів	100
7.6. Електромагнітне поле тіла людини	101
8. Акустичні явища в живій природі	103
8.1. Загальні відомості	103

8.2. Акустичні коливання під час польоту комах і птахів	103
8.3. Принцип дії природного локатора	104
8.4. Акустичні локатори кажанів	108
8.5. Акустичні локатори птахів	108
8.6. Акустичні локатори дельфінів	109
8.7. Загадкова акустична зброя китоподібних	110
8.8. Акустичне поле тіла людини	110
9. Вплив фізичних полів на живу матерію	111
9.1. Загальні відомості	111
9.2. Гравітаційне поле	112
9.3. Електромагнітне поле	112
9.4. Електричні та магнітні поля	114
9.5. Акустичне поле	118
9.6. Таємниця біолокаційних властивостей людини	122
10. Поняття про біоніку	123
10.1. Загальні відомості	123
10.2. Напрямки та перспективи біоніки	125
11. Новітня гіпотеза зародження життя	126
12. Короткі підсумки	127
13. Питання та вправи для самостійної роботи	132
ЛІТЕРАТУРА	144



=ПЕРЕДМОВА НАУКОВОГО РЕДАКТОРА=

Давно ведуться розмови про користь і необхідність читання інтегруючих курсів природознавства як у середній школі, так і на молодших курсах університетів. Але зробити це не просто. Справа в тому, що в середній школі, а тим більше в університетах має місце «спеціалізація». Тут вивчають фізику, хімію, біологію й інші природничі дисципліни. Кожен педагог – фахівець лише в рамках своєї дисципліни. Це одна із причин, з яких в Україні дотепер підготовлений тільки один підручник з інтегруючого курсу природознавства. Є книги, які написали філософи й для філософів. Зрозуміло, що в них відсутні формули, графіки, таблиці тощо.

Друга причина полягає в тому, що фактично відсутні програми таких курсів. У принципі всі дисципліни допускають взаємну інтеграцію й мають потребу в ній. Вважаємо виправданим об'єднати, з одного боку, природничі науки, що вивчають неживу матерію, а з другого – біологію та біосферу. Саме так зробив автор книги. Він охопив практично необхідні для студента молодших курсів університетів (та й старшокласника) природничі науки про живу природу та біосферу. Застосування законів фізики до живої матерії є основною метою курсу «Фізика біосфери».

Коротко про підручник. Перш за все, його написав фізик. Автор поставив перед собою важке завдання викласти з єдиних позицій відомості про фізику біосфери на рівні, доступному для студента 2–4 курсів і навіть для старшокласника.

Підручник відрізняється проблемністю навчання, логічністю побудови, стислістю і ясністю викладу. Авторіві повною мірою

вдалося обґрунтувати ідею про те, що фізика біосфери являє собою інтегровану науку, й підготувати підручник. Використання в тексті елементарних обчислень сприяє кращому розумінню досліджуваного предмета. Авторів вдалося продемонструвати, що майже всі явища природи в першому наближенні (на рівні оцінок) можна описати, спираючись на знання, отримані в середній школі та на перших курсах університету.

Автор приділяє увагу багатьом неklasичним і нетрадиційним питанням.

Наприкінці підручника перераховані його основні результати, а також дано питання й вправи. Більшість завдань є оригінальними. Вони сформульовані таким чином, що в процесі розв'язання студент може відчувати себе дослідником, який вивчає наукову проблему. Але головне, глибина розв'язання залежно від здатностей студента може бути різною. Цим вправи мені нагадують знамениті задачі академіка П. Л. Капиці.

Підручник дозволяє досягти всіх поставлених цілей – освітньої, виховної й розвивальної. Думаю, що він значно випередив свій час.

Книга становить безсумнівний інтерес для студентів молодших курсів природничих і філософських факультетів університетів, учнів старших класів і широкого кола читачів, що цікавляться концепціями сучасного природознавства.

Кілька слів про автора. Чорногор Леонід Феоктистович – завідувач кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету (ХНУ) імені В. Н. Каразіна, доктор фізико-математичних наук, професор, академік АН Вищої освіти України, академік АН Прикладної радіоелектроніки Білорусії, Росії, України, лауреат ряду престижних премій України й колишнього СРСР, Заслужений діяч науки і техніки України, Заслужений професор ХНУ імені В. Н. Каразіна, Почесний професор Харбінського інженерного університету, Почесний професор Ціндаоського університету. За більш ніж 50 років роботи в Харківському державному університеті (тепер – ХНУ імені В. Н. Каразіна) поставив більше двадцяти нових курсів, опублікував понад 1300 наукових праць, підготував 15 підручників

і 17 монографій. Є відомим фахівцем в сфері космічної радіофізики, фізики геокосмосу, фізики атмосфери й фізики Землі та фізичної екології.

Л. М. Литвиненко,
академік НАН України,
Радіоастрономічний
інститут НАН України



ДО ЧИТАЧА

*О, сколько нам открытий чудных
Готовит просвещенья дух:
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай – бог-изобретатель...*

О. С. Пушкін

Любі друзі!

Свій курс «Фізика біосфери» я розпочну зі слів відомого поета Федора Івановича Тютчева

*Не то, что мните вы, природа:
Не слепок, не бездушный лик...
В ней есть душа, в ней есть свобода,
В ней есть любовь, в ней есть язык...*

Ф. І. Тютчев

Шановні друзі!

Чи зможете Ви зараз відповісти на такі питання?

Що таке жива природа? Як вона пов'язана з неживою матерією? Що являє собою вчення про біосферу? Що являє собою вчення про ноосферу? Які умови зародження життя? Як застосовують закони, встановлені для неживої матерії, до живих об'єктів? Чи можуть тварини та рослини передбачати зміни погоди, грізні землетруси, цунамі, виверження вулканів? Чи може це людина? Яким чином це відбувається?

На ці та інші питання Ви зможете відповісти, вивчивши курс «Фізика біосфери».

Провчившись у школі стільки років, вступивши до університету, Ви багато чого знаєте й багато чого вмієте. Але наука – невичерпна, як невичерпна Природа. Хотілося б, щоб тепер Ви глянули на неї з висоти свого положення й побачили її Єдність. А ще її Велич, Красу, Неосяжність, Динаміку й Вічність. А чи відповісте Ви на такі питання: Як і з чого та коли виникла жива матерія та біосфера? Що чекає її в майбутньому? Які екстремальні умови здатна витримати біосфера? Чи знаєте Ви основні закони еволюції біосфери? Що визначає розмір живого організму? Чи впливає людина на біосферу, свою планету, космос, погоду й клімат? Як діє природній локатор? В чому полягає акустична зброя китоподібних? Що Ви знаєте про таємничі біолокаційні властивості людини? Чому біосфера та людина – явище й земне, і космічне? В чому полягає антропний принцип?

Відповісти на ці питання зараз Вам непросто. Але, прочитавши цей підручник, я думаю, Ви відповісте на них без вагань.

Як працювати з книгою? Її треба читати, а потім вивчати. Зустрівши незрозуміле або складне, не зупиняйтеся, читайте далі. Прочитавши розділ, поверніться до нього ще раз. Часто незрозуміле спочатку виявиться згодом доступним і навіть очевидним. Але якщо це не так, читайте далі. Не лякайтеся формул, чисел і таблиць, їх можна пропустити, але тоді Ви багато чого втратите. Адже формули й числа – це містке вираження головних істин. Не засмучуйтеся, якщо числа погано запам'ятовуються, повертайтеся до них неодноразово й порівнюйте їх з Вам відомими. Поступово «відчуття числа» прийде саме по собі. Не забувайте, що наука починається там, де з'являється число, вимір, порівняння.

Основні визначення, закони й формули вивчіть напам'ять. Засвоїти матеріал Вам допоможуть численні питання й вправи наприкінці книги. Не дивуйтеся, якщо в завданні, як Вам здається, не

вистачає даних – задавайте їх з довідників, знаходьте в тексті цього навчального посібника. Відповіді на завдання не дано навмисне. Розв’язуючи задачу, Ви перетворюєтеся в дослідника, у вченого, який, досліджуючи наукову проблему, теж не знає відповіді, як не знає її ніхто. Навчіться знаходити помилки в розв’язку й переко-нуватися в його правильності, не маючи у своєму розпорядженні відповіді.

Як розв’язувати задачі? Спочатку вчитайтесь в умову, визначте, до якого розділу належить задача. Перечитайте цей розділ, підготуйте необхідні формули. Запишіть, що відомо, що треба знайти, додайте довідникові дані, що пов’язані з задачею. Побудуйте логічну схему: для знаходження шуканої величини x треба знати y , але її можна обчислити, якщо відомо z , і т. д. Потім розв’яжіть задачу в буквеному вигляді. Деякі невідомі величини часто скорочують. Перевірте розмірності лівої й правої частин рівняння, вони повинні бути однаковими. Зробіть граничні переходи до більш простих випадків, переконайтеся в їхній реальності. Виконайте чисельні розрахунки, спробуйте зрозуміти, наскільки результат розумний.

Успіхів Вам!



ВСТУП

Як чудово відчувати єдність цілого комплексу явищ, які за безпосереднього сприймання здавались розрізненими.

А. Ейнштейн¹

Ми познайомимося з тим, як пов'язана фізика з рештою наук, як пов'язана ця решта наук одна з одною, та й що таке сама наука.

Р. Фейнман

Істина є донькою часу, а не авторитету.

Ф. Бекон

В істини проста мова.

Г. С. Сковорода

- *У чому полягають особливості цього курсу?*
- *Як пізнають і описують біосферу?*
- *Чим займається фізика біосфери?*
- *Чи можна описати біосферу математично?*
- *Чому наукових дисциплін так багато?*
- *Як застосувати фізичні закони до біосфери?*

В.1. Особливості курсу

Фізика – це основна наука природознавства про властивості та будову матерії, про форми її руху та зміни, про загальні закономірності явищ неорганічної природи.

Біосфера – це сукупність усього живого на Землі, включаючи літосферу, атмосферу та гідросферу.

Біофізика – це фізика живих систем на різних рівнях їх організації – молекулярному, мембранному, клітковому, органному та популяційному.

Фізика біосфери (біосферна фізика) – це міждисциплінарна наука про фізичні закони та закономірності в біосфері (живій матерії).

Пропонований курс «Фізика біосфери» – інтегруючий, тобто такий, що об'єднує й підсумовує відомості про біосферу з точки зору фізики. Він призначений для вивчення на 2 – 4 курсах природничих (філософських) факультетів університетів. Зрозуміло, окремі підрозділи курсу можна використовувати під час вивчення цілої низки природничих факультативних курсів.

Викладення матеріалу сконцентровано навколо фізики – найбільш ємної науки про природу.

У курсі порівняно багато простих, але необхідних обчислень й оцінок. Це повинне сприяти більш глибокому засвоєнню матеріалу, одержанню уявлень про порядки величин параметрів й ефектів. Крім того, виконання оцінок має виробити навички до використання отриманих знань на практиці. У студента повинна з'явитися впевненість у тому, що природу в першому (грубому) наближенні можна описати, використовуючи знання, отримані в середній школі або принаймні на 1 – 2 курсах природничих факультетів університетів.

Виведення формул, як правило, відсутнє тоді, коли вони впливають із матеріалів, наведених у відомих підручниках.

Автор уважає, що саме курс «Фізика біосфери» сприяє розв'язанню задачі гуманітаризації освіти, оскільки він базується на таких шести принципах.

1) Матеріалістичний принцип. Він утверджує, що світ розвивається за об'єктивними законами, у ньому немає місця «дивам»: всі спостережувані явища можуть бути витлумачені з позиції науки.

2) Світоглядний принцип. Він пов'язаний з розумінням походження, будови, еволюції навколишнього світу, а також методології його вивчення.

3) Моральний принцип. Він полягає в тому, що «істина в останній інстанції» належить науці. Висновки науки про природу – об'єктивні, вони не залежать від політичної кон'юнктури, традицій, авторитетів, країни й т. п.

4) Естетичний принцип. Його суть в тому, що наука про природу дозволяє зрозуміти красу навколишнього світу на всіх його структурних рівнях.

5) Особистісний принцип. Він пов'язаний з вихованням у студента почуття особистої відповідальності за долю навколишнього світу. Тільки знання законів природи може допомогти виховати особистість.

6) Загальнокультурний принцип. Він стверджує, що людину не можна вважати культурною, якщо вона не володіє знаннями науки про природу й навколишній світ на тому ж рівні, як знаннями літератури, мов, історії, філософії й інших гуманітарних дисциплін.

В.2. Цілі та завдання курсу

Курс «Фізика біосфери» – міждисциплінарний. Він підсумовує елементи різних природничих дисциплін, таких як фізика й хімія, геологія й геофізика, метеорологія й кліматологія, фізика атмосфери й фізика космосу, астрономія й астрофізика, космологія й космогонія, біологія й біофізика, екологія й ін. У ньому ви-

вчають основні положення про будову біосфери, закономірності її еволюції. У курсі обґрунтовано науковий світогляд.

Курс має три взаємозв'язані цілі: освітню, виховну й розвивальну.

Освітня мета полягає у формуванні й поглибленні наукових знань про природу загалом, навичок у їхньому використанні, в умінні узагальнювати й оцінювати вірогідність спостережуваних явищ природи.

Суть виховної мети – у формуванні наукового світогляду, діалектичного мислення, методології пізнання, природничого й екологічного мислення й поведінки.

Розвиваюча мета полягає в удосконалюванні логічного мислення, уміння використовувати дедукцію й індукцію, аналіз і синтез, уміння робити узагальнення, а також у розвитку творчих здібностей.

Курс базується на дисциплінах, які вивчають в університеті (у середній школі), істотно доповнює їх, наводить між ними своєрідні мости.

Вивчивши курс, студенти будуть знати:

- загальні відомості про світ живої природи;
- ідею про єдність живої й неживої матерії, природи й природничих дисциплін;
- методи опису й оцінки основних фізичних явищ у біосфері.

Студенти будуть уміти:

- доцільно застосовувати отримані знання у власному повсякденному житті;
- обґрунтовувати науковий світогляд і світобачення;
- раціонально вирішувати біосферні проблеми.

В.3. Структура курсу

Підручник складається зі вступу, одинадцяти розділів, переліків основних результатів курсу та переліку завдань для самостійної роботи.

У першому розділі дані загальні відомості про живу матерію.

У другому розділі описано процес виникнення та існування живої матерії.

У третьому розділі розглянуто основні закони еволюції біосфери.

У четвертому розділі обговорюються розміри та маси живих організмів.

П'ятий розділ присвячено оцінці швидкості та прискорення живих організмів.

У шостому розділі оцінюються енергія та потужність живих організмів.

Сьомий розділ присвячено електромагнітним явищам у живій природі.

У восьмому розділі розглядаються акустичні явища в живій природі.

У дев'ятому розділі описано вплив фізичних полів на біосферу.

У десятому розділі наведено основні поняття про біоніку.

В одинадцятому розділі сформульована новітня гіпотеза зародження життя.

Кожен розділ починається з постановки задачі, потім розглянуто суть питання, дані короткі підсумки, задачі й вправи.

В.4. Питання та вправи для самостійної роботи

1. Запишіть найвеличніші формули фізики. Чому їх так називають?
2. Хто відноситься до основоположників експериментально-го та теоретичного природознавства?
3. Розкажіть про методи пізнання світу.
4. Навіщо потрібен дослід? Чому «дослід – критерій істини»?
5. Навіщо створюють теорії?
6. Яким умовам повинна задовольняти теорія?
7. Які цілі переслідує наш курс? Як Ви це розумієте?
8. Прокоментуйте такий вислів А. Ейнштейна: *«Теорія пізнання без контакту з наукою стає порожньою схемою. Наука без теорії пізнання, наскільки вона взагалі мислима без неї, примітивна й безладна».*
9. Подумайте, що хотів сказати американський фізик Р. Фейнман, коли писав: *«Не підозрюючи про можливості простих рівнянь, люди часто роблять висновок, що для пояснення всієї складності світу потрібно щось дане від Бога, а не просто рівняння?»*
10. Поміркуйте над словами фізика Дж. Максвелла: *«У той час як у каламбурі дві істини приховані в одному вираженні, в аналогії єдина істина виражається двояким чином».*
11. Наведіть приклади плідного «співробітництва» одних наук з іншими. У чому воно полягає?
12. Поміркуйте про те, що дають людині наука й мистецтво.
13. Прокоментуйте пораду давньогрецького історика Полібія: *«У тих випадках, коли можна знайти причину того, що відбувається, не слід звертатися за допомогою до богів».*
14. Поміркуйте над словами О. Гумбольдта: *«Для розумного споглядання природи є єдність у множині, поєднання різноманітного за формою й складом... Головна мета розумного вивчення природи полягає в тому, щоб у розмаїтості пізнати єдність...».*



Життя... є не випадковим явищем у світовій еволюції, але тісно з нею пов'язаним наслідком.

В. І. Вернадський

Наш обмежений розум для зручності ділить... цей світ на частини: фізику, біологію, геологію, астрономію, психологію й т. д., але природа насправді ніякого розподілу не знає!

Р. Фейнман

У вік космосу наука повинна все глибше осягати механізм зв'язків між Сонцем і живою природою.

О. Л. Чижевський

1. Загальні відомості про біосферу

Під живою матерією будемо розуміти досить складний молекулярний організм, здатний розмножуватися й зазнавати в процесі еволюції мутації. Мутація – виникаюча природно або викликана штучна зміна спадкоємних властивостей організму в результаті перебудов і порушень у генетичному матеріалі організму – хромосомах і генах.

За сучасними уявленнями жива матерія з'явилася з неживої близько 4 млрд років тому. Біля витоків теорії виникнення життя

стояв радянський академік О. І. Опарін. Припускають, що виникненню найпростіших організмів у Світовому океані сприяла сонячна радіація, електричні розряди в атмосфері й інші фактори.

У наш час жива матерія виявлена лише на Землі, точніше в тонкому приповерхньому шарі – біосфері.

1.1. Ознаки живої матерії

Жива матерія, що виникла з неживої, зберігає в собі властивості останньої. Обидва види матерії утворені з тих самих молекул або атомів. Разом з тим жива матерія має набір ознак, які дозволяють відрізнити її від неживої. Перелічимо їх.

1. Складність й упорядкованість утворень.
2. Споживання речовини, енергії й інформації з навколишньої природи.
3. Здатність адаптуватися до зміни середовища перебування.
4. Наявність реакції на вплив.
5. Саморозвиток живої матерії, закладений в її генній структурі.
6. Еволюційні зміни.
7. Здатність до розмноження.

1.2. Зв'язок живої й неживої матерії

Як ми вже відзначали, жива матерія виникла з неживої. Далі вони існували й розвивалися спільно. Жива матерія черпає речовину, енергію й інформацію з неживої. Зміна космічної радіації, сонячної активності, температури поверхні й атмосфери Землі та інші фактори істотно впливають на все живе на планеті.

Жива матерія у свою чергу впливає на неживу. Так, біологічні організми можуть істотно впливати на склад ґрунту, збагачуючи його. Рослинність насичує повітря киснем. Живі організми очищують гідросферу. Нарешті, енергооснащеність людини зростає на-

стілки, що вона уже здатна змінити вигляд всієї планети і її околиць.

Як для живої, так і для неживої природи характерні велика розмаїтість, цілісність і взаємодія. Спосіб існування живої й неживої матерії – рух у просторі й у часі. Обом видам матерії властива як самоорганізація (тобто процес перетворення простого в складне), так і деградація (зворотний процес). Завдяки балансу між процесами самоорганізації й деградації виник й еволюціонує Всесвіт і життя в ньому.

Російський академік М. М. Моїсеєв писав: *«...Між живим і неживим, можливо, і не існує настільки різкої межі, як вважали дотепер. Межа між живою й неживою речовиною, напевно, розмита, а різноманіття форм самоорганізації матерії, можливо, має відносно стійкі утворення, які важко віднести тільки до живої або тільки до неживої матерії»*. Він стверджував: *«Єдиний процес розвитку охоплює неживу природу, життя й, нарешті, суспільство. Все це – ланки єдиного ланцюга, і тому природно спробувати описати весь процес розвитку однією мовою, у рамках єдиної схеми з використанням загальної термінології»*.

В основі всіх процесів у неживій природі лежать закони природознавства, точніше фізики й хімії. Процеси, що протікають у живій природі, також підкоряються цим законам. Справедливість цього твердження перевірена всім досвідом наукової діяльності людства. На сьогодні не ясно, чи впливають закони живої природи із законів фізики й хімії, чи зводяться вони до них?

Єдність живої й неживої матерії оспівав І. А. Бунін:

Стемнело. Вдоль аллея, над сонными прудами,
Бреду я наугад.
Осенней свежестью, листвою и плодами
Благоухает сад.

Давно он поредел, – и звездное сиянье
Белеет меж ветвей.
Иду я медленно, – и мертвое молчание
Царит во тьме аллея.

И звонок каждый шаг среди ночной прохлады.
И царственным гербом
Горят холодные алмазные Плеяды
В безмолвии ночном.

1.3. Рівні організації живої матерії

До рівнів організації живої матерії віднесемо такі:

- молекулярний;
- клітинний;
- організменний;
- популяційно-видовий;
- суспільство людей.

Розглянемо їх докладніше.

1. *Молекулярний рівень*. У молекулі міститься від 2 до $\sim 10^5$ атомів. До самих великих молекул відносять біомолекули – структурну основу живих організмів, розмір яких у десятки – мільйони разів більше розмірів окремого атома. На молекулярному рівні живу матерію досліджує фізико-хімічна біологія.

2. *Клітинний рівень*. Клітина являє собою елементарну живу систему, основу будови й життєдіяльності тварин і рослин. Розмір клітини – від 10^{-7} до 0,1 м. До найменших клітин відносять бактерії, до найбільших – яйце (наприклад, яйце страуса має довжину близько 16 см). На клітинному рівні живу матерію вивчає дисципліна, яку називають цитологією.

3. *Організменний рівень*. Організм складається з великої кількості клітин (наприклад, у людині міститься близько $2 \cdot 10^{12}$ клітин). На такому рівні живу природу вивчає ембріологія, анатомія, фізіологія й інші дисципліни.

4. *Популяційно-видовий рівень*. За такого підходу вивчають закономірності поведінки певної популяції і її взаємодію з навколишнім світом. Наприклад, зайці харчуються травою й корою дерев, а хижаки – лисиці, вовки, рисі й ін. – знищують зайців. На цьому рівні живу природу вивчають такі дисципліни, як біогеографія, екологія й т. п.

5. *Суспільство людей*. Людиноподібна істота (австралопітек) з'явилася на Землі в результаті еволюції живої матерії близько 5 млн років тому, а люди сучасного виду (кроманьйонці) – 40 тис. років тому.

1.4. Вчення Ч. Дарвіна

Вчення Дарвіна (дарвінізм) – теорія еволюції органічного світу Землі.

Ключовими поняттями вчення Ч. Дарвіна є мінливість, спадковість і відбір. Вони утворюють чудову тріаду, тобто трійку фундаментальних понять. Мінливість є основою утворення нових ознак у будові й функціях біологічних об'єктів. Спадковість закріплює ці ознаки. Природний відбір спричиняє загибель об'єктів, не пристосованих до умов існування.

Дарвінізм проливає світло на механізми саморуху живої матерії.

Ч. Дарвін і його попередники К. Ліней і Ж.-Б. Ламарк показали, що людина є останньою і найбільш досконалою ланкою в еволюції живої природи. Дарвінізм стверджує, що людина й мавпа мали спільних предків. На жаль, дотепер не знайдено проміжну ланку між людиноподібною мавпою й людиною. Цю гіпотетичну істоту іноді називають троглодитом (людино-твариною).

Існують й інші погляди на походження людини, які також базуються на науковому світогляді. У принципі не виключено, що людина – істота штучного походження. Її могли створити більш високорозвинені позаземні цивілізації. Звичайно, така можливість є малоімовірною, а аргументи, що її підтверджують, поки не знайдені.

На користь вчення Ч. Дарвіна, яке підтримує більшість учених, свідчать такі факти.

1. Тіло людини складається з таких же атомів і молекул, як і все інше на Землі й за її межами.

2. Клітинна структура тіла людини споріднена зі структурою рослин і тварин.

3. Будова організмів людини й високорозвинених тварин подібні.

4. Людина – жива істота, і їй властиві всі ті біофізичні й біохімічні процеси, що й іншим живим об'єктам. Ці процеси зводяться до обміну речовиною, енергією й інформацією з навколишнім світом. Людина має розум. В інших тварин виявляють лише його зародки. Людина відрізняється також наявністю свідомості. Тварини мають більш прості форми реакції на навколишнє середовище (подразнення, чутливість й т. п.).

Таким чином, людина – найбільш розвинена істота в ієрархічній будові світу.

Людина – частина суспільства, що є результатом взаємодії людей, різних їхніх співтовариств (родини, колективу, країни й т. п.). Суспільство, як і людина, перебуває в безперервній взаємодії із природою. Воно виникло із природи, воно є її частиною. І в природі, і в суспільстві діють певні об'єктивні закони. Частина законів є спільною як для природи, так і для людини, суспільства. І хоча природа й суспільство єдині, це не виключає відмінностей між ними. Якщо в природі всі закони проявляються стихійно, то людина й суспільство використовують їх свідомо. Вони перетворюють природу й себе разом з нею. Тварини ж лише адаптуються до навколишнього середовища.

Людина й суспільство – предмет вивчення не тільки й не стільки природознавства.

Людину й суспільство людей вивчає багато дисциплін. До них відносять філософію, соціологію, етику, естетику, психологію, історію й ін.

Дарвінізм – одна з найпоширеніших теорій еволюції живої матерії. Є й інші, альтернативні їй, теорії. Загалом же виникнення життя й походження людини на Землі – найхвилюючі таємниці, не цілком розгадані сучасною наукою.

Закінчимо розділ словами російського письменника й філософа О. І. Герцена:

«Ми звели людський світ відмежовувати кам'яною стіною від світу природи; це несправедливо, насправді взагалі немає ніяких строго проведених меж і граней...»

2. Виникнення й існування живої матерії

У ХХ столітті з'явилися надії, що походження життя зможе пояснити фізика. Якщо це так, то відбудеться свого роду Суперсупер-об'єднання теорій, що описують неживу й живу матерії. Російський фахівець у галузі хімічної фізики й біофізики Л. Л. Морозов про це написав таке: *«...Можливо ще більш значне "Велике об'єднання" здатне об'єднати відкриті нам тіні законів неживої й живої матерії, включити виникнення й розвиток живого в єдиний ланцюг еволюції Всесвіту, показати, що виникнення, принаймні первинних, законів біоорганічного світу – явище того ж порядку, що й генезис інших законів фізичної природи».*

Нижче розглянемо докладніше зародження й умови існування життя.

2.1. Еволюція Всесвіту та живої матерії на Землі

Наведемо й коротко обговоримо характерні часові інтервали еволюції Вселеної й живої матерії, що виникла на Землі (табл. 1).

Життя з'явилося на Землі вже незабаром після утворення планети (перші сотні мільйонів років). У той же час еволюція від бактерій до людини йшла винятково довго (більше 4 млрд років). Повільним був розвиток людини від австралопітека до кроманьйонця

(близько 5 млн років). Історія сучасної людини становить десятки тисяч років. Маємо самоприскорювальний процес.

Рушійною силою еволюції був природний відбір разом зі здатністю живої природи до мутацій. У процесі еволюції виникло близько 500 млн видів біологічних об'єктів, а в цей час їх налічують близько 2 млн. І їх кількість продовжує зменшуватися.

2.2. Умови життя

Для виникнення життя необхідне існування умов, які ми розділимо на астрономічні й планетарні. Розглянемо їх докладніше.

Астрономічні умови.

1. Для виникнення життя на планеті потрібно було, щоб вона перебувала вдалині від вибухаючих зірок, потужних джерел рентгенівського й ультрафіолетового випромінювань.

2. Бажано, щоб світило було одне. Якщо зоряна система – подвійна або потрійна, то планета рухається по складній траєкторії, або занадто наближаючись до зірки, або помітно від неї віддаляючись. Припустимо, щоб зоряна система була подвійною, але зі значним періодом обертання другої зірки (~ 10 – 100 млн років).

Не виключено, що в основі Сонячної системи перебуває подвійна зірка (сестра Сонця названа Немезидою, на ім'я грецької богині відплати, її період обертання оцінюють у 26 млн років).

Саме з таким періодом, як показали геологічні (точніше палеонтологічні) дослідження, на Землі відбуваються катастрофічні вимирання видів.

Остання катастрофа відбулася близько 13,5 млн років тому. Епоха вимирання динозаврів (65 млн років тому) також збігається з передбачуваним часом наближення до Землі невловимої Немезиди.

3. Зірка повинна бути стаціонарною протягом декількох мільярдів років. Саме такою зіркою і є Сонце. Потік енергії від нього залишається незмінною величиною.

4. Орбіта планети повинна бути близькою до колової, у цьому випадку значні перепади температури на планеті відсутні.

**Еволюція Всесвіту й земного життя
(еволюційний календар)**

Подія	Коли мала місце, мільйони років
Великий вибух	13 000
Утворення галактик	12 600
Утворення Сонячної системи	4 600
Утворення Землі	4 400
Виникнення життя	4 000
Утворення гір	3 700
Поява бактерій	3 400
Поява водоростей	3 300
Виникнення фотосинтезу	2 200
Поява клітини з ядром	2 100
Виникнення кисневої атмосфери	1 300
Поява багатоклітинних	1 000
Поява черв'яків	600
Поява риб	500
Колонізація рослинами суші	450
Поява амфібій	370
Поява дерев	330
Поява динозаврів	290
Поява ссавців	200
Поява птахів	160
Колонізація тваринами суші	120
Поява приматів	80
Поява гомінід	40
Поява австралопітека	5
Поява кроманьйонця	0,04

5. Радіус планетарної орбіти R_{op} повинен мати величину, що забезпечує сприятливу температуру поверхні планети й газу в її атмосфері. Якщо планета перебуває занадто близько до світила,

то через відносно високу температуру атмосфери не відбувається конденсації водяних парів і не утворюється гідросфера (океани, моря, ріки й озера). Якщо ж планета віддалена від зірки – джерела тепла – настає її зледеніння. (Наприклад, для Землі радіус орбіти міг бути зменшений усього на 8 або збільшений на 2 млн км.) Із цієї причини на Венері відсутня гідросфера, а на Марсі під сухою поверхнею, можливо, залягають потужні льодовики.

Планетарні умови.

1. Планета повинна мати близькі до оптимальних значення радіуса R_p і маси M_p . Величина R_p повинна становити 0,01 – 0,1 млн км. Якщо R_p перевищить $\sim 0,1$ млн км, то така планета за рахунок гравітаційного стискання нагрівається і її властивості наближаються до властивостей зірок. Якщо $R_p \ll 10\,000$ км, то планета не здатна утримувати атмосферу й гідросферу. Із цієї причини немає атмосфери в Місяця ($R_p \approx 1800$ км) і Меркурія ($R_p \approx 2\,400$ км).

У супутника Сатурна Титана є щільна атмосфера (його радіус $R_p \approx 5150$ км близький до радіуса Землі). Оптимальна маса планети $M_p \sim 10^{23} - 10^{27}$ кг. Маса Землі ($5 \cdot 10^{24}$ кг) цій умові задовольняє.

2. Вік планети повинен бути досить великий для того, щоб на ній встигло розвинути еволюційним шляхом життя (біля мільярда років).

3. Планета повинна мати порівняно щільну атмосферу з оптимальним вмістом кисню. Нагадаємо, що в земній атмосфері його вміщується близько 21 %. Як показали дослідження, якби O_2 було менше всього на 15 – 18 %, то процес горіння був би неможливий, людина ніколи б не опанувала вогню, а отже, не мала б гарячої їжі, бронзових і залізних знарядь праці... Без вогню навряд чи виникла цивілізація. Звичайно, при цьому могли б існувати рослини й тварини. Однак якби в земній атмосфері концентрація кисню перевищила всього на 30 – 70 %, то на Землі палахкотили б пожежі від будь-якої іскри, удару блискавки й т. п.

Атмосфера захищає планету від згубної ультрафіолетової радіації, а магнітосфера – від високоенергетичних космічних частинок.

4. Для виникнення живої матерії планета повинна мати гідросферу (воду в рідкому стані на поверхні планети), а отже, необхідні умови для концентрації водяних парів (див. вище).

5. На планеті повинно бути достатньо природних ресурсів, включаючи такі речовини, як водень, кисень, вуглець й азот. Саме на їхній основі виникли молекули ДНК зокрема й життя загалом. Вважаємо надто малоімовірним існування живої матерії на основі не вуглецю, а спорідненого йому кремнію.

6. Для сприятливого протікання біологічних і хімічних реакцій повинен бути сприятливий температурний режим. Для людини, ссавців і птахів оптимальна температура становить 30 – 40 °С. При цьому має місце найбільша ефективність ферментів, що визначають швидкості біологічних процесів.

Зрозуміло, жива матерія в процесі еволюції пристосовувалася до умов на планеті, а не навпаки.

2.3. Екстремальні умови життя

Вище розглянуто умови для зародження й еволюції живої матерії, близькі до оптимального. Тут обговоримо її поведінку в екстремальних умовах, тобто за істотних змін температури й тиску атмосфери, вологості й рівня радіації.

Температура.

Жива матерія погано переносить як підвищення, так і зниження температури навколишнього середовища.

Більшість бактерій, що не утворюють спор, гине вже за температури $t \approx 60$ °С за час близько 30 хв. Деякі неспоротворні бактерії виявлені в гарячих джерелах з $t \approx 100$ °С.

Спори деяких бактерій переносять і більш високі температури (табл. 2).

**Час життя споротворних бактерій в умовах
лабораторних експериментів**

Температура, °С	Час життя, хв
100	150 – 300
110	30 – 50
120	7 – 10

Існують теплолюбні бактерії, для яких оптимальна температура – біля $t \approx 70$ °С.

Розглянемо вплив низьких температур. Відомі бактерії, гриби й водорості, зростання яких триває за $t \approx -10$ °С й навіть за -20 °С. Фотосинтез у лишайників і хвойних дерев протікає навіть за температури $20 - 30$ ° морозу. В арктичних й антарктичних морях мікроорганізми живуть за $t \approx -10$ °С. Морози в -200 °С переносять багато бактерій, дріжджі, гриби й найпростіші організми (тихохідки, коловертки й ін.). Деякі види бактерій виживають після короткочасного перебування за температур, близьких до абсолютного нуля ($t \approx -273$ °С).

У природних умовах мікроорганізми переносять низькі температури досить довго. Так, у вічній мерзлоті в Якутії ще на початку ХХ століття було виявлено мікрофлору, вік якої – десятки тисяч років.

В Антарктиді в шарі льоду на глибині 35 м знайдено життєздатні мікроорганізми, вік яких обчислюють тисячоріччями.

Життєздатність істотно залежить від швидкості заморожування.

Зневоднювання.

Спори після повного висихання зберігають життєздатність протягом сотень років. Неспоротворні бактерії також стійкі до зневоднювання. Вони зберігають життєздатність протягом ~ 10 років.

Мікроскопічні організми (коловертки, тихохідки й ін.), будучи майже повністю збезводнені, оживали через два тижні після змочування водою.

Досліди показали, що клітини дріжджів, висушених за $t \approx 105$ °С, після тривалого перебування у вакуумі зберігали в собі кілька відсотків води. Не виключено, що подібні клітини могли б бути виявлені, наприклад, на Марсі.

Тиск.

Найпростіші організми виявляються стійкими до впливу тисків $\sim 600 - 700$ атм ($6 \cdot 10^7 - 7 \cdot 10^7$ Па) протягом десятків днів.

У нафтових свердловинах на глибині ~ 1 км, де тиск $p \sim 200$ атм, знайдено бактерії, що постійно там живуть.

У мулі Філіппінської западини в Тихому океані виявлено бактерії на глибині близько 10 000 м ($p \approx 10^3$ атм).

Проведені дослідження показали, що межа тиску, за якого мікроорганізми ще виживають, становить близько 6 000 атм, а для спор – 20 000 атм.

Розглянемо вплив наднизьких тисків, вони становлять інтерес у зв'язку з космічними дослідженнями.

У лабораторних умовах одержують вакуум з $p \approx 10^{-13}$ атм і температурами від -200 до $+200$ °С. Виявляється, що за такого тиску спорова бактерії зберігають життєздатність протягом декількох днів за позитивних температур і протягом декількох років за $t \approx -30$ °С. Неспорова бактерії менш життєздатні. Виняткову здатність до виживання в екстремальних умовах спостерігають у водоростей і найпростіших.

Іонізуюче випромінювання.

Розрізняють низькоенергетичне (ультрафіолетове) і високоенергетичне випромінювання. До останнього відносять рентгенівські й гамма-кванти, потоки нейтронів й інших частинок.

Доза низькоенергетичного випромінювання d , що учиняє поведінку дію, являє собою добуток густини потоку енергії випромінювання на його тривалість. Дозу d звичайно вимірюють у Дж/м².

Радіація, як правило, діє згубно. Що коротше довжина хвилі випромінювання, то воно небезпечніше. Малі дози ультрафіолетового випромінювання можуть стимулювати обмін речовин у живій матерії.

Мікроорганізми можуть витримувати значну дозу ультрафіолетового опромінення. Як видно з табл. 3, найбільш стійкими є клітини рожевих дріжджів, вони здатні виживати за $d \approx 600$ Дж/м². Така радіація мала місце на Землі до появи на ній життя.

Таблиця 3

Граничні дози ультрафіолетового опромінення ($\lambda = 300$ нм)

Мікроорганізми	Доза, Дж/м ²
Деякі бактерії	~10
Деякі інфузорії	~40
Морський джгутиконосець	~110
Клітини рожевих дріжджів	~620

Додамо, що багаторазове опромінення сприяє підвищенню стійкості до впливу цього фізичного фактора.

Високоенергетичне випромінювання (його вплив вимірюють у Дж/кг) учиняє об'ємну дію. Воно по-різному впливає на живу матерію й мікроорганізми зокрема. У результаті повторного впливу випромінювання можуть виникати стійкі форми, спостерігатися мутації.

Про високу життєздатність мікроорганізмів свідчать факти їхнього виявлення у воді поблизу природних потужних радіоактивних джерел і навіть у воді ядерних реакторів. В останньому випадку дози радіації досягають $\sim 10^4$ Дж/кг. Для людини смертельною є доза 10 Дж/кг.

Гіпотеза панспермії.

Можливість існування живої матерії в екстремальних умовах має пряме відношення до її зародження й поширення у Всесвіті.

Ще в 1907 р. відомий хімік С. Ареніус висунув припущення, що життя на Землю було занесене з інших світів у вигляді спор мікроорганізмів (гіпотеза панспермії). Ця гіпотеза не суперечить матеріалістичному світоглядові. В принципі спори з розмірами 10^{-6} – 10^{-5} м можуть переноситися в космосі під дією світлового тиску на дуже великі відстані. У наш час цю гіпотезу вважають малоймовірною, оскільки мікроорганізми, що одержали дозу радіації $\sim 10^6$ Дж/кг, навряд чи здатні вижити.

Про зародження й існування живої матерії у Всесвіті російський поет М. А. Заболоцький написав так:

Там я звездное чую дыханье,
Слышу речь органических масс,
И стремительный шум созиданья,
Столь знакомый любому из нас.

2.4. Біологічні ритми

Під біологічними ритмами (або коротко біоритмами) розуміють періодичні процеси в живій матерії. Біоритми можуть бути внутрішніми або зовнішніми. До перших відносять, наприклад, серцебиття й пов'язані з ним цикли, до других – космічні фактори. Розглянемо їх докладніше.

Перелічимо основні космічні ритми.

1. *Добові ритми*. Вони зумовлені обертанням Землі навколо власної осі. Їхня тривалість – близько 24 годин. З добовими ритмами пов'язані приливні процеси з періодом 12 годин. Добові ритми – найважливіші, тому що вони забезпечують фотоциклічні процеси (тобто зміну освітленості неосвітленістю).

2. *Місячні ритми*. Довгий час вважали, що їх викликає обертання Місяця навколо Землі. Тривалість місячного періоду – близько 27 доби. Справа в тому, що приблизно з таким же періодом (близько 25 діб) обертається Сонце навколо своєї осі, керуючи біологічними процесами.

3. *Річні ритми*. Вони регулюють сезонні процеси. Період ритмів – 365 діб. Їх також відносять до найважливіших.

4. *Сонячні ритми*. Краще інших вивчено цикл із періодом 11 років, очевидно, він же є найголовнішим. Існують і більш тривалі цикли сонячної активності. Всі вони пов'язані з процесами, що відбуваються всередині світила.

5. *Довгоперіодні космічні ритми*. Ці ритми вивчені вкрай недостатньо. Прикладом гіпотетичного космічного ритму є цикл із періодом 26 млн років. Його пов'язують із наближенням до Землі зірки Немезиди (див. підрозділ 2.2).

Перераховані ритми істотно впливають на живу матерію. Вони регулюють швидкість процесів у ній, швидкість розмноження й вимирання особин і навіть зникнення видів (як цикл із періодом 26 млн років). Вплив зовнішніх ритмів на живі організми ще раз свідчить про те, що життя – явище космічне, а не тільки земне.

2.5. Геліобіологія та учення О. Л. Чижевського

Із усіх космічних факторів головним для Землі є Сонце, тому що наша планета перебуває ніби в продовженні атмосфери свого світила, точніше в потоці сонячного вітру. Воно не тільки постачає живій матерію енергією, сприяє її народженню й розвитку, але й керує більш тонкими процесами. Спалахи на Сонці обумовлюють істотні зміни в живій природі. Одинадцятирічний цикл сонячної активності викликає багато процесів на Землі з тим же періодом: посилене розмноження бактерій, зростання захворювань, епідемії, збільшення популяцій і багато іншого. Більше того, не виключено, що багато соціальних потрясінь також стимульовано діяльністю Сонця.

Вплив сонячної активності на живу матерію вивчає геліобіологія. Як ми вже відзначали, її основоположником є О. Л. Чижевський. Він створив нове вчення, що тепер має його ім'я. О. Л. Чижевський уперше науково обґрунтував гіпотезу про те, що багато сонячних і земних процесів синхронні, що *«життя слід вважати явищем космічним, роботою космічних сил»*.

У монографії «Епідемічні катастрофи й періодична діяльність Сонця», виданій у 1930 р., він пише: *«Ще в далекій давнині було помічено, що трапляються епохи, коли ніщо не порушує мирного плину життя, чому сприяє не тільки людина, але й сама природа. Але бувають часи, коли й світ природи, і світ людський приходять у хвилювання: стихійні катастрофи, повені або посухи, землетруси або виверження вулканів, масові нальоти шкідливих комах, повальні хвороби серед тварин і людей, війни й міжусобиці уражають цілі країни. У такі часи допитливий погляд спостерігача вважає безсумнівним існування зв'язку між організмом і навколишнім середовищем. Ця думка про зв'язок живих організмів і зовнішньої природи проходить червоною ниткою по всьому величезному історичному досвіду людства».*

Створюючи своє вчення, О. Л. Чижевський ґрунтувався на багатьох відомих на той час фактах зв'язку сонячної активності із частотою магнітних бур (Ламонт, 1850 р.), частотою полярних сьйів (Фрітц, 1863 р.), частотою гроз (Зенгер, 1887 р.), температурою повітря й води (Гаутьер, 1844 р.), частотою бур, ураганів, смерчів і кількістю опадів (Мелдрун, 1872 г.), землетрусами (Мале, 1858 р.), кількістю вироблюваного вина (Сарторіус, 1878 р.), товщиною річних кілець дерев (Шведов, 1892 р.), розмноженням і міграцією комах (Кепеї, 1870 р.), величиною улову риб (Нансен, 1909 р.), частотою раптових смертей (Кіндліман, 1910 р.) й іншими явищами. Багато цікавих процесів, що ілюструють вчення О. Л. Чижевського, описано в його книзі «Земне відлуння сонячних бур» (Москва, Думка, 1976 р.).

О. Л. Чижевський був переконаний у такому:

Мы дети Космоса. И наш родимый дом
Так спаян общностью и неразрывно прочен,
Что чувствуем себя мы слитыми в одном,
Что в каждой точке мир - весь мир сосредоточен...
И жизнь – повсюду жизнь в материи самой,
В глубинах вещества от края и до края
Торжественно течет в борьбе с великой тьмой,
Страдает и горит, нигде не умолкая.

У другій половині ХХ століття вчення О. Л. Чижевського одержало істотний розвиток. Стало ясно, що на земні процеси можуть значно впливати спалахи наднової зірки в околиці Сонячної системи, падіння великого метеорита й астероїда, зіткнення з кометою, проходження Сонячної системи через галактичну хмару молекулярного водню й інші фактори. Завдяки цьому геліобіологія, власне кажучи, перетворилася в космічну біологію, що змикається з екологією космосу.

Зазначена вище закономірність – один із проявів «космізації» науки в цілому.

2.6. *Поняття про космізм*

Космізм – космічне бачення й розуміння світу. Космізм обумовлений самою природою людини як істоти земної, сонячної й космічної. Космізм містить у собі елементи природознавства, психології, мистецтва й релігії. Тому формулу космізму можна представити так:

Космізм = Природознавство + Психологія + Мистецтво + Релігія.

Ідеї космізму вплинули на розвиток наук і в першу чергу – природознавства.

Космізм формувався поступово, пройшовши п'ять ступенів. Перелічимо їх.

1. *Народний космізм.* Виник в епоху первісної людини. Космос або Всесвіт наш далекий предок уявляв неосяжним небесним будинком. У поглядах переважав релігійний початок.

2. *Літературно-художній космізм.* Почав формуватися в античні часи, коли з'явилися перші малюнки, легенди й казки. Переважали релігійні й естетичні початки.

3. *Філософський космізм.* Він виріс із народного космізму кілька тисячоріч тому. Одержав істотний розвиток у Стародавній Греції, Індії й Китаї. Релігійний підхід було замінено науковим.

4. *Науковий космізм*. З'явився як результат прогресу в астрономічних і натурфілософських знаннях. Базувався на вченнях Птолемея, Архімеда, Коперніка, Кеплера, Ньютона, Ейнштейна, Фрідмана, Хабла, Ціолковського, Вернадського, Чижевського та багатьох інших учених. Продовжує розвиватися й у наш час. Науковий початок витиснув релігійний.

5. *Науково-технологічний космізм*. Початок веде із середини ХХ століття, коли було запущено перший ШСЗ (1957 р.), перша людина полетіла в космос (1961 р.), нога людини вперше ступила на неземне космічне тіло (1969 р.). Становленню цього рівня космізму сприяли такі вчені: К. Е. Ціолковський, Ф. А. Цандер, Ю. В. Кондратюк, Г. Оберт, Р. Годард, С. П. Корольов і багато інших.

Космізм – захоплення багатьох поетів. Не залишився байдужим до нього й І. А. Бунін. Одній із зірок він присвятив такі рядки:

Тебя зовут божественною, Мира,
Царицею в созвездии Кита.
Таинственна, как талисманы Пирра,
Твоей недолгой жизни красота.
Ты, как слеза, прозрачна и чиста,
Ты, как рубин, блистишь среди эфира,
Но не за блеск и дивные цвета
Тебя зовут божественною, Мира.

Ты в сонме звезд, среди ночных огней
Нежнее всех. Не ты одна играешь,
Как самоцвет: есть ярче и пышней.
Но ты живешь. Ты меркнешь, умираешь –
И вновь горишь. Как феникс древних дней,
Чтоб возродиться к жизни – ты сгораешь.

І. А. Бунін запитував:

Где ты, звезда моя заветная,
Венец небесной красоты?
Очарованье безответное
Снегов и лунной высоты?
Где молодость простая, чистая,
В кругу любимом и родном,
И старый дом и ель смолистая
В сугробах белых под окном?

Пылай, играй стоцветной силою,
Неугасимая звезда,
Над дальнею моею могилою,
Забытой богом навсегда!

2.7. Антропний принцип

У процесі еволюції з'явилася високоорганізована мисляча істота – людина. Вона виявилася здатною пізнавати світ і себе як його частину. Першою стадією пізнання є вивчення того, як побудовано світ, другою – чому він саме такий. Про це у свій час А. Ейнштейн писав: «...*Ми хочемо не тільки знати, як побудована природа (і як відбуваються природні явища), але й по змозі досягти мети, можливо, утопічної й зухвалої на вигляд, – довідатися, чому природа є саме такою, а не іншою...*»

Антропний принцип (у своєму «сильному» формулюванні) стверджує, що Всесвіт побудований так, щоб у ньому могло зародитися життя й щоб жива матерія була здатна пізнати Всесвіт. Це твердження – гіпотеза. Від неї недалеко й до релігії. Гіпотезу висловив американський фізик і астрономом Р. Діке в 1961 р., а потім розвинув астрофізик Б. Картер у 1973 р. Антропний

принцип активно обговорюють космологи, фізики, філософи, біологи, соціологи й історики. Він не є загальноприйнятим.

Антропний принцип (у своєму «слабкому» формулюванні) стверджує, що якби фундаментальні константи (маса електронів, протонів, нейтронів, π -мезонів, гравітаційна стала, стала Планка, швидкість світла й ін.) були іншими, Всесвіт був би інший і життя в ньому ніколи б не зародилося.

На щастя, наш Всесвіт дивним чином пристосований для виникнення й еволюції життя.

Закінчимо цей розділ словами В. Я. Брюсова:

Я – сын Земли, дитя планеты малой,
Затерянной в просторе мировом...

От протоплазмы до ихтиозавров,
От дикаря, с ружьем из кремня,
До гордых храмов, дремлющих меж лавров,
От первого пророка до меня, –

Мы были узники на шаре скромном,
И сколько раз, в бессчетной смене лет,
Упорный взор земли в просторе темном
Следил с тоской движения планет!

Вы, властелины Марса иль Венеры,
Вы, духи света иль, быть может, тьмы, –
Вы, как и я, храните символ веры:
Завет о том, что будем вместе мы!

3. Основні закони еволюції біосфери

Розглянемо загальні питання, що стосуються біосфери й ноосфери, а також основні закони еволюції біосфери та їх математичні моделі.

3.1. Вчення про біосферу

Біосфера – область активного життя на планеті. Вона охоплює верхню частину літосфери (на глибину приблизно до 3 км), гідросферу, тропосферу й частину стратосфери (на висотах до 20 км). Іноді спори найпростіших живих об'єктів виявляють не тільки в стратосфері, але й на висотах до 100 км.

Біосфера – система.

До складу біосфери входять вуглець, азот, водень, кисень, сірка й багато мікроелементів. Усі перераховані елементи переходять із неживої матерії до рослин, від них – до тварин і людини. Після загибелі живої матерії хімічні елементи перетікають у неживу речовину. Тому біосфера – це гігантська система, де здійснюється колообіг хімічних елементів на Землі. Біосфера – відкрита система, у неї безупинно надходить енергія з космосу, в основному від Сонця. Потужність падаючого випромінювання становить величину близько $8 \cdot 10^{16}$ Вт. Частина енергії Сонця (їй відповідає потужність близько $5 \cdot 10^{13}$ Вт) «консервується» у зелених рослинах, швидкість збільшення маси яких порядку $6 \cdot 10^6$ кг/с для всієї Землі загалом. При цьому в процесі фотосинтезу за 1 с поглинається $\sim 10^4$ кг вуглекислоти, виділяється $\sim 6 \cdot 10^3$ кг кисню й випаровується $\sim 8 \cdot 10^8$ кг води.

Параметри біосфери.

Біомаса рослин m_6 становить близько $2 \cdot 10^{15}$ кг. Їй відповідає хімічна енергія

$$E_{6x} = q_6 m_6 \approx 2 \cdot 10^{22} \text{ Дж},$$

де $q_6 \approx 10^7$ Дж/кг – питома енергія. Маса тваринного світу – приблизно дорівнює $2 \cdot 10^{13}$ кг ($E_{6x} \approx 2 \cdot 10^{20}$ Дж). Щорічний приріст біомаси рослин становить величину $\sim 2 \cdot 10^{14}$ кг (а енергії – $2 \cdot 10^{21}$ Дж). Потужність рослинного світу

$$E_6 = q_6 \frac{\Delta m_6}{\Delta t}.$$

Для $\Delta m_6/\Delta t \approx 6 \cdot 10^6$ кг/с маємо $P_6 \approx 6 \cdot 10^{13}$ Вт. Для тваринного світу вона на два порядки менша. Таким чином, потужність біосфери фактично визначається потужністю рослинного світу.

Біосфера виконує біогеохімічні функції, до яких відносять: газозу (сполуки O_2 , CO_2 , N , H_2 , S й інших речовин); концентраційну (акумуляцію H , C , N , O , Na , Mn , Fe й інших елементів); окислювально-відновну (сполуки солей, оксидів; окислювання речовин і т. п.); біохімічну (дихання, харчування, розмноження, відмирання).

Біомаса займає здебільшого сушу; у Світовому океані її в 10^3 разів менше ($\sim 10^{12}$ кг). Щільність живих організмів (тобто їхня кількість, віднесена до одиниці площі) залежить від розмірів біологічних об'єктів, необхідної для їхнього життя площі, умов проживання, терміну відтворення t_v і життя t_j , а також інших факторів (табл. 4).

Таблиця 4

Мінімальна площа проживання особи S_1 і популяції S_p , а також мінімальна чисельність осіб у популяції

Організм	t_v , рік	t_j , рік	S_1 , M^2	S_p , M^2	N
Бактерія	10^{-4}	10^{-4} і більше	10^{-14}	$>10^{-8}$	$>10^6$
Велика клітина	$10^{-2} - 1$	10^{-2} і більше	10^{-4}	$1 - 10$	$10^4 - 10^5$
Рослина					
трав'яниста	1	1	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^2 - 10^4$	$10^5 - 10^6$
Дерево	1	$10 - 10^2$	$1 - 10$	$10^3 - 10^4$	10^3
Комаха	$10^{-2} - 1$	$10^{-2} - 1$	$10 - 10^2$	$10^6 - 10^8$	$10^5 - 10^6$
Миша	$0,3 - 1$	$1 - 10$	$10 - 10^2$	$10^4 - 10^6$	$10^3 - 10^4$
Птах	1	$1 - 10$	$10^3 - 10^4$	$10^6 - 10^7$	$10^2 - 10^3$
Вовк	1	10	$10^5 - 10^6$	$10^8 - 10^9$	$10^2 - 10^3$
Олень	1	10	$10^6 - 10^7$	$10^9 - 10^{10}$	$10^2 - 10^3$
Слон	1	10	$10^7 - 10^8$	$10^{10} - 10^{11}$	$10^2 - 10^3$

Примітка. Дерево секвоя живе до 5 000 років, птах ворон і черепаха – до 300 років.

Живі організми, або особи, одного виду поєднуються в популяції, які здатні самостійно функціонувати на ізольованій площі,

що має назву субареал. Змішуванню популяцій перешкоджають як біологічні, так і географічні бар'єри. Чисельність осіб у популяції N змінюється в широких межах, вона залежить від географічних умов, сезону й року, тривалості життя, плідності й інших факторів. Спостереження показали, що за $N \leq 100 - 300$ популяція може припинити своє існування.

Популяція – одиниця виду, одиниця еволюції. Вид являє собою сукупність осіб, що мають подібність, схрещуються й дають потомство. Вид займає в природі певну площу, яку називають ареалом. Вид складається з безлічі популяцій.

Параметри популяцій.

Розглянемо, від яких факторів залежить кількість осіб n , що мають масу більш ніж m і віднесені до одиниці життєвого простору (площі або об'єму). Величину n називають щільністю популяції. Відповідно до закону розподілу n пов'язане з масою особи степеневою залежністю (див. також розділ 2.2):

$$n = \frac{A}{m^\alpha},$$

де A й α – константи. Під час зміни маси тварин і рослин у широких межах (на десять порядків) показник $\alpha \approx 0,75$. Стала A залежить від географічних умов, урожайності ґрунтів, частоти випадання дощів, їхньої інтенсивності й т. п. Зручно виразити A через масу найбільшої для даного ареалу тварини (рослини) m_0 і щільності цих тварин (рослин) n_0 :

$$A = n_0 m_0^\alpha.$$

Тоді закон розподілу щільності популяції набуває вигляду:

$$n = n_0 \left(\frac{m_0}{m} \right)^\alpha.$$

Як видно з цього співвідношення, що менше m , то більше n .

Частина простору, необхідна для життєдіяльності однієї особи, дорівнює

$$\Delta V = \frac{1}{n} = \frac{1}{n_0} \left(\frac{m}{m_0} \right)^\alpha.$$

Важливо, що питома величина цього простору

$$\frac{\Delta V}{m} = \frac{1}{n_0 m} \left(\frac{m}{m_0} \right)^\alpha \sim m^{\alpha-1} \sim m^{-1/4}$$

убуває зі зростанням маси. Інакше кажучи, що менше біооб'єкт, то більше життєвого простору він займає. Це стосується тварин, птахів і рослин.

Відповідно до правила енергетичної еквівалентності маса їжі, яку споживають n осіб, для певного ареалу залишається постійною, тобто

$$m_{\text{п}} n = B = \text{const.}$$

Звідси маса їжі, що її поглинає один організм:

$$m_{\text{п}} = \frac{B}{n} = \frac{B}{n_0} \left(\frac{m}{m_0} \right)^\alpha \sim m^{3/4},$$

$$\frac{m_{\text{п}}}{m} \sim m^{-1/4}.$$

Таким чином, відносна кількість споживаної їжі тим більше, що менше біооб'єкт. Для рослин «їжею» є вуглекислий газ і ксилемний сік (для вищих рослин).

Таким чином, основні властивості біосфери визначаються тим, що біосфера – це глобальна відкрита система із численними прямими й зворотними зв'язками. Тому для її вивчення потрібен системний підхід. Останній припускає вивчення системи в цілому, без вичленовування її окремих властивостей.

Термін «біосфера» увів в обіг Е. Зюс у 1875 р. Учення про біосферу створив В. І. Вернадський – основоположник нової інтегруючої дисципліни – біогеохімії. Вона пов'язала хімію Землі з хімією живої матерії й установила роль останньої в перетворенні земних оболонок – літосфери, атмосфери й гідросфери. Вчений дійшов висновку, що на 99 % зовнішній шар земної кори перероблений живими організмами. Він також усвідомив роль космосу у формуванні біосфери. В. І. Вернадський писав: «...У нашому сторіччі біосфера одержує зовсім нове розуміння... як планетне явище космічного характеру». В іншій роботі він відзначав, що

«...своєрідним, єдиним у своєму роді, відмінним і неповторним в інших небесних тілах є для нас образ Землі – її зображення в космосі, що вимальовується ззовні, з боку, з далечини нескінченних небесних просторів. В образі Землі проявляється поверхня нашої планети – її біосфера, її зовнішня область, що обмежує її від космічного середовища».

3.2. Вчення про ноосферу

Поняття «ноосфера» (тобто сфера розуму) увели в 1927 р. французькі вчені Е. Леруа й Т. де Шарден. В. І. Вернадський розглядав ноосферу як новий еволюційний стан біосфери. Ноосферу створює на Землі й у її околицях діяльність істоти розумної – людини. За задумом автора вчення, ноосфера повинна являти собою *«розумну, раціональну оболонку»*.

В. І. Вернадський стверджував: *«У біосфері існує велика геологічна, можливо, космічна сила, планетну дію якої звичайно не беруть до уваги в уявленнях про космос, уявленнях наукових або тих, що мають наукову основу... Цією силою є розум людини, спрямована й організована воля його, як істоти суспільної».*

Чи зуміє людина скористатися цією силою, направити її на добро, а не самознищення? Чи доросла вона до вміння використати ту силу, що неминуче повинна дати їй наука? Учені не повинні закривати очі на можливі наслідки їхньої наукової праці, наукового процесу. Вони повинні мати почуття відповідальності за всі наслідки їхніх відкриттів. Вони повинні пов'язати свою роботу із кращою організацією всього людства».

У наш час діяльність людини, на жаль, далека від такого ідеалізованого погляду. Тому ноосферою є фактично та оболонка, на яку людина чинить значний вплив. Більш точно її варто називати антропосферою (тобто сферою, що її сформувала людина).

На межі XX – XXI століть населення Землі досягло 6 млрд чоловік, за масою – близько $5 \cdot 10^{11}$ кг (або 0,4 % від усієї біомаси). І хоча людство становить лише малу частку маси біосфери, воно

чинить на неї, як і на всю планету, значний вплив. Людина добула кілька мільярдів тонн корисних копалин, створила штучні ріки й водоймища, вирубала ліси на величезних територіях. Вона розробила джерела енергії, порівнянні за своїми параметрами з природними процесами. Сейсмічні хвилі рукотворного походження проникли вглиб Землі, радіохвилі – на відстані порядку 100 світлових років ($\sim 10^{19}$ м). Космічні апарати землян перебувають на Місяці, Венері, Марсі й навіть далеко за межами Сонячної системи. Такі масштаби діяльності людини, такі за сучасними поглядами масштаби ноосфери (антропосфери).

Завдяки ідеям В. І. Вернадського, О. Л. Чижевського й інших дослідників космос, Сонце, Землю й біосферу ми уявляємо єдиною системою. Вивчення цієї системи є життєво необхідним.

3.3. Загальні відомості про закони еволюції біосфери

Астрономія й фізика були першими природничими науками, що відкрили математичні закони, які коротко та ёмно описували сутність основних процесів й явищ. Уже в XIX столітті з'явилася математична фізика, що стала класичною дисципліною. Незабаром до згаданих наук приєдналися хімія, геологія й інші природничі дисципліни. На відміну від них біологія до середини XIX століття залишалася описовою наукою. Навіть її перші фундаментальні закони (вчення Ч. Дарвіна про походження видів, біогенетичний закон Ф. Мюлера й Е. Гекеля про співвідношення онтогенезу) були якісними. Математика повільно проникала й у наступні закони біології (закон Менделя про моногібридне і дигібридне схрещування; закон Харді – Вайнберга про сталість відносної частоти генів за вільного схрещування; закон Моргана про явище зчеплення генів, що локалізовані в одній хромосомі; закон гомологічних рядів у спадкоємній мінливості, що його відкрив М. І. Вавілов). Ці закони були скоріше якісними, ніж кількісними.

По-справжньому математичні методи стали застосовувати в біології лише в ХХ столітті. Почала здійснюватися давня мрія біологів про зведення цієї науки до невеликого числа відносно простих законів, що мають математичне вираження. Прикладом служила класична фізика, в основі якої лежали три закони Ньютона і його ж закон всесвітнього тяжіння. У біології були сформульовані рівняння, які описують зростання чисельності організмів (популяцій), конкуренцію видів, взаємодію популяцій й ін. Оскільки основною властивістю біосфери є її динаміка, її еволюція, то й рівняння є еволюційними. Вони описують зміну параметрів біосфери і її властивостей у часі. У математиці такі співвідношення є диференціальними рівняннями.

Перші рівняння математичної біології з'явилися в піонерських книгах А. Лотки «Елементи фізичної біології» й «Елементи математичної біології», виданих у 1925 р. і 1956 р. відповідно.

До кінця ХХ століття стало ясно, що, незважаючи на очевидні досягнення, біологія в її математичному описі істотно відстає від фізики, хімії й інших природничих наук про неживу матерію. Справа в тому, що біосфера значно складніша від світу неживої природи. Біосфера і її частини мають саморегуляцію, самоадаптацію й цілеспрямовану активність, що дуже складно врахувати в математичних моделях. Тому згадані вище еволюційні рівняння (або еволюційні закони) описують лише основні риси процесу або явища, нехтуючи деталями. Однак саме деталі часто бувають істотними в біології. Їхнє врахування вимагає значного ускладнення еволюційних рівнянь і математичних моделей біосфери. Проте можна стверджувати, що в ХХ столітті закладені основи математичної біології. У наш час ця наука бурхливо розвивається, її моделі стають усе більше складними.

3.4. Найпростіший закон зростання чисельності організмів

Розглянемо зміну числа організмів Δx за час Δt . Швидкість зміни $\Delta x/\Delta t$ залежить від їхнього числа x , причому

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x}{\tau_1} - \frac{x}{\tau_2},$$

де τ_1, τ_2 – характерні часи. Перший з них – середній інтервал часу між появою двох поколінь, а другий – середня тривалість життя. У правій частині рівняння перший член описує швидкість розмноження, другий – швидкість загибелі організмів. Передбачається достаток їжі й відсутність природних ворогів. За $\Delta t \rightarrow 0$ рівняння стає диференціальним:

$$x' = \frac{x}{\tau_1} - \frac{x}{\tau_2}.$$

Тут x' – похідна функції $x(t)$ за часом. Очевидно, що за $\tau_1 = \tau_2$ число організмів залишається незмінним, тобто x не залежить від часу й дорівнює своєму значенню в деякий початковий момент часу.

Якщо ввести

$$\tau_0 = (\tau_1^{-1} - \tau_2^{-1})^{-1},$$

то рівняння набуде вигляду:

$$x' = \frac{x}{\tau_0}.$$

Його розв'язок:

$$x(t) = x_0 e^{t/\tau_0},$$

де $x_0 = x(t=0)$ – кількість організмів у початковий момент часу, $e \approx 2,71$ – основа натурального логарифма. Залежність $x(t)$ показано на рис. 1. З нього видно, що за $\tau_0 > 0$ число організмів необмежено зростає, тому що швидкість їхнього розмноження більша від швидкості загибелі (тобто $\tau_1 < \tau_2$). Якщо ж $\tau_2 < \tau_1$, то $\tau_0 < 0$, й число організмів із часом наближається до нуля (вимирання відбувається швидше, ніж народження).

Додамо, що, наприклад, для бактерій час $\tau_0 \approx 25 - 30$ хв.

Розглянуту модель англійський економіст Т. Мальтус (1766 – 1834 рр.) уперше запропонував для опису зростання населення Землі.

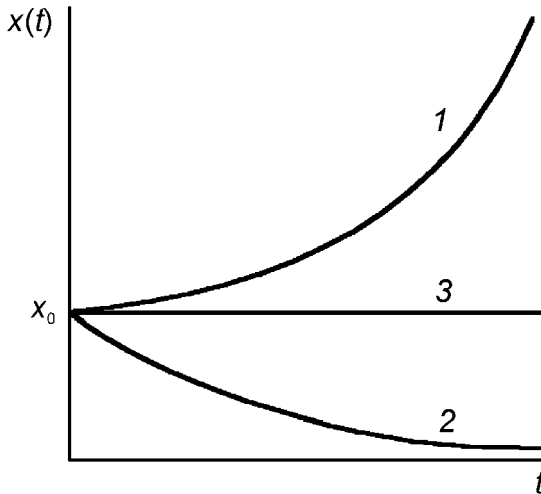


Рис. 1. Залежність числа організмів від часу:
 1 – $\tau_0 > 0$; 2 – $\tau_0 < 0$; 3 – $\tau_0 = 0$

Вона непогано описувала реальний процес у XVIII столітті. Однак більш досконалішими є моделі, викладені в підрозділі 3.5.

Таким чином, обговорюваний закон зводиться до експоненційного зростання (або убуття) чисельності організмів за достатку їжі й відсутності природних ворогів.

3.5. Квадратичний закон росту чисельності організмів

У цьому випадку швидкість розмноження організмів, що входять у склад популяції, пропорційна x^2 , а швидкість загибелі, як і раніше, $-x$. Тоді еволюційне рівняння має вигляд:

$$x' = \alpha x^2 - \frac{x}{\tau_2},$$

де $\alpha > 0$ – розмірний коефіцієнт, що не залежить від x . На невеликих інтервалах часу можлива лінеаризація останнього рівняння.

І тоді квадратичний закон переходить у найпростіший закон зростання чисельності організмів.

Спочатку знайдемо стаціонарні розв'язки цього рівняння, коли $x' = 0$, тобто

$$\alpha x^2 - \frac{x}{\tau_2} = 0.$$

Звідси $x_1 = 0$, $x_2 = (\alpha\tau_2)^{-1}$. Перший розв'язок не цікавий, оскільки він означає відсутність організмів. Смысл розв'язку x_2 стане зрозумілим з подальшим розглядом.

Розв'язок вихідного рівняння має вигляд:

$$x(t) = \frac{x_0 x_2}{x_0 + (x_2 - x_0) e^{t/\tau_2}}.$$

Залежність $x(t)$ показано на рис. 2.

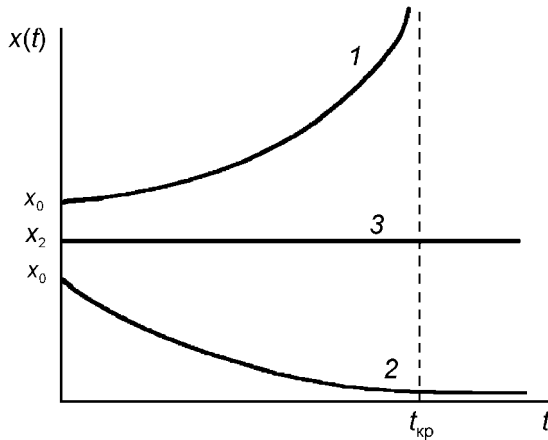


Рис. 2. Залежність числа організмів від часу:

1 - $x_0 > x_2$; 2 - $x_0 < x_2$; 3 - $x_0 = x_2$

З нього видно, що значення x_2 є пороговим. За $x_0 = x_2$ число організмів залишається незмінним, за $x_0 < x_2$ функція $x(t)$ з часом прямує до нуля (вимирання переважає народжуваність), за $x_0 > x_2$ має місце необмежене зростання числа організмів за скінчений час

$$t_{\text{кр}} = \tau_2 \ln \frac{x_0}{x_0 - x_2}.$$

Такі процеси мають назву вибухової нестійкості. Вони дуже небажані для біосфери. Подібні події на Землі мали місце. Наприклад, коли з Європи в США завезли горобця або в Австралію – кролика. В обох випадках у знову прибулих організмів не було природних ворогів і тому «вибухнула» чисельність популяції. Обставини стабілізувались тільки після того, як люди почали знищувати горобців і кроликів. Ці приклади наочно показали, що біосфера (або її частина) – дуже вразлива оболонка і втручатися в її еволюцію просто небезпечно. Результат втручання часто неможливо передбачити.

Квадратичний закон зростання чисельності організмів зумовлює «вибух» числа осіб за скінчений час за наявності достатку їжі й у відсутності хижаків.

Розглянута модель із певними застереженнями описує також зростання чисельності населення. Момент часу $t_{\text{кр}}$ (тобто «вибух») згідно з моделлю повинен настати в першій половині ХХІ століття (за деякими даними в 2025 р.). Зрозуміло, цього не відбудеться, тому що викладена модель не враховує того факту, що α і τ_2 самі залежать від x , а також від енергії, що споживає людство, їжі, від забруднення біосфери продуктами діяльності людини тощо. З урахуванням цих факторів треба очікувати стабілізації чисельності населення (за оцінками С. П. Капиці на рівні 15 млрд чоловік).

У квадратичному законі зростання чисельності населення є наслідком не тільки і не стільки швидкості відтворення, скільки здатності суспільства забезпечити розвиток виробничих сил, високий рівень життя і охорони здоров'я.

3.6. Логістичний закон

Логістична модель має такий вигляд:

$$x' = \beta x - \alpha x^2, \quad \alpha, \beta > 0.$$

Вона задовільно описує багаточисельні явища насичення, в тому числі й стабілізацію зростання числа організмів, чисельностей популяцій і населення. Стабілізація настає за рахунок конкуренції всередині популяції. З формальної точки зору це означає, що в найпростішому законі зростання чисельності організмів параметр τ_1^{-1} є такою функцією x , що лінійно убиває (покажіть це самостійно).

Рівняння має стаціонарні розв'язки: $x_1 = 0$ і $x_2 = \beta/\alpha$. Саме на рівні $x = x_2$ проходить стабілізація числа організмів. Нестаціонарний розв'язок для розглянутої моделі такий:

$$x(t) = \frac{x_0 x_2}{x_0 + (x_2 - x_0) e^{-\beta t}}.$$

Залежність $x(t)$ показана на рис. 3.

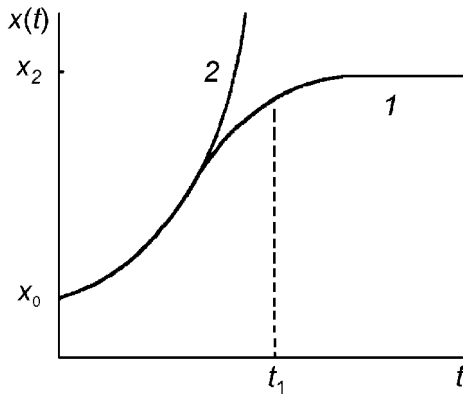


Рис. 3. Залежність числа організмів від часу:

1 — у логістичній моделі; 2 — у моделі Т. Мальтуса

Видно, що час виходу на стаціонарний розв'язок порядку $t_1 = \beta^{-1}$. Таким чином, логістичний закон стверджує, що швидкість зростання чисельності організмів поступово зменшується і врешті-решт припиняється.

Додамо, що логістичну модель описали на початку 20-х р. XX століття екологи з США Перл і Рід. Але ще раніше (в 1838 р.) її запропонував бельгійський математик П. Ф. Ферхюльст для вивчення чисельності народонаселення. Саме логістичний закон біологи й екологи ставлять в один ряд із законами Ньютона.

3.7. Закон конкурентного витіснення

Закон базується на математичній моделі, яка розробили італійський математик В. Вольтера і незалежно А. Лотка (модель Вольтери – Лотки). Головне твердження полягає в тому, що два види, що конкурують через одну і ту ж їжу, яка є в обмеженому об'ємі, не можуть співіснувати стабільно. Один вид витісняє інший, прирікаючи його на загибель. Таким чином, два види, що перебувають в одній і тій же екологічній ніші, не можуть стало співіснувати, маючи спільний ареал існування.

Розглянемо закон конкурентного витіснення докладніше. Нехай чисельність видів – $x(t)$ і $y(t)$, термін їх відтворення – τ_{11} і τ_{22} , час життя – τ_{12} і τ_{21} . Зміну чисельності видів у часі описують такими диференціальними рівняннями:

$$x' = \frac{x}{\tau_{11}} - \frac{x}{\tau_{12}}, \quad y' = \frac{y}{\tau_{22}} - \frac{y}{\tau_{21}}. \quad (1)$$

На відміну від найпростішого закону розмноження популяцій тут τ_{12} і τ_{21} залежать від x і y . Будемо вважати, що

$$\tau_{12} = \frac{1}{k_1 y}, \quad \tau_{21} = \frac{1}{k_2 x}, \quad k_1, k_2 > 0.$$

При цьому часи життя видів тим менше, що більше чисельність їх конкурентів. З урахуванням цього вихідна система рівнянь (1) набуде такого вигляду:

$$x' = \frac{x}{\tau_{11}} - k_1 x y, \quad y' = \frac{y}{\tau_{22}} - k_2 x y. \quad (2)$$

У стаціонарному випадку $x' = y' = 0$. Тоді

$$\frac{x}{\tau_{11}} - k_1 xy = 0, \quad \frac{y}{\tau_{22}} - k_2 xy = 0.$$

Уважаючи, що x і y відмінні від нуля, знайдемо розв'язок останньої системи рівнянь:

$$x_0 = (k_2 \tau_{22})^{-1}, \quad y_0 = (k_1 \tau_{11})^{-1}. \quad (3)$$

Далі необхідно з'ясувати, чи стійкі популяції з чисельностями x_0 і y_0 . Для цього покладемо

$$x = x_0 + \Delta x, \quad |\Delta x| \ll x_0,$$

$$y = y_0 + \Delta y, \quad |\Delta y| \ll y_0$$

і підставимо ці вирази для x і y у систему диференціальних рівнянь (2). Нехтуючи малою величиною $\Delta x \Delta y$, після перетворень з урахуванням (3) одержимо:

$$\Delta x' = -k_1 x_0 \Delta y,$$

$$\Delta y' = -k_2 y_0 \Delta x.$$

Нехай за рахунок флуктуацій збільшиться, наприклад, чисельність виду y , тобто $\Delta y > 0$. Тоді з першого рівняння маємо $\Delta x' < 0$ (необхідно пам'ятати, що $k_{1,2} > 0$, $x_0, y_0 > 0$), тобто $\Delta x < 0$. Як впливає з другого рівняння, при цьому $\Delta y' > 0$, тобто y стане ще більше. Це означає, що виникає нестійкість, у результаті якої вид у повністтю витісняє вид x . Якщо на початку $\Delta x > 0$, то, навпаки, виживає вид x , а його конкурент приречений на вимирання. Останнє проходить в основному за час

$$\tau_0 = \sqrt{\tau_{11} \tau_{22}}.$$

3.8. Закон взаємодії популяцій

Взаємодію різних популяцій у природі пояснюємо на прикладі моделі «хижак – жертва». Її сутність коротко полягає в такому. Ще в XIX столітті в малонаселених районах Північної Америки було помічено, що протягом багатьох десятків років чисельність забитих

мисливцями зайців і рисей змінювались у часі за майже періодичним законом з періодом 10 років (± 1 рік), причому максимум числа рисей запізнювався приблизно на 1 рік щодо максимуму числа зайців. Крім того, відносна амплітуда коливань чисельності перших приблизно в п'ять разів менше за відносну амплітуду коливань чисельності других. Пояснимо це явище.

Згідно з 11-річним циклом сонячної активності вироблювана маса рослинної їжі для зайців змінюється. З її збільшенням кількість останніх зростає. Вони слугують їжею для рисей, число яких починає збільшуватися, а отже, рисі знищують більшу кількість зайців. За зменшення числа жертв неминуче настає зменшення числа хижаків. Час запізнення другого процесу стосовно першого дорівнює часу відтворення хижака, тобто у випадку рисі – одному року. Після зменшення кількості рисей число зайців збільшується, і процес повторюється з періодом близько 10 років. Таким чином, кількість особин двох популяцій дійсно змінюється за періодичним законом.

Опишемо взаємодію популяцій рівняннями, які і являють собою модель «хижак – жертва». Розглянемо зміни чисельності зайців x і рисей y за час Δt та запишемо рівняння «балансу» чисельності популяцій у заданому ареалі (не занадто малому, щоб виявилися статистичні закономірності, але й не занадто великому, щоб була істотною взаємодія популяцій). Ці рівняння мають такий вигляд:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x}{\tau_3} - k_1xy, \quad \frac{\Delta y}{\Delta t} = k_2xy - \frac{y}{\tau_p}, \quad (4)$$

де τ_3 – характерний час відтворення зайців; τ_p – час життя рисей; член k_1xy описує швидкість загибелі зайців, що пропорційна числу зустрічей жертви й хижака xy ; k_2xy – характеризує швидкість розмноження рисей, вона теж пропорційна xy . Зазначимо, що як і в попередніх моделях, процеси, що відображають збільшення числа особин, описують членами зі знаком плюс, а процеси, що характеризують їхню загибель, – зі знаком мінус.

Переходячи в (4) до $\Delta t \rightarrow 0$, одержимо такі диференціальні рівняння:

$$x' = \frac{x}{\tau_3} - k_1xy, \quad y' = k_2xy - \frac{y}{\tau_p}, \quad (5)$$

де x' й y' – похідні за часом. Співвідношення (5) описують нелінійні коливання величин x й y навколо положення стійкої рівноваги, де $x = x_0$ й $y = y_0$. Ці значення можна визначити з умови $x' = y' = 0$, тобто

$$\frac{x}{\tau_3} - k_1xy = 0, \quad k_2xy - \frac{y}{\tau_p} = 0. \quad (6)$$

Вважаючи, що x й y відмінні від нуля, з (6) одержимо:

$$x_0 = (k_2\tau_p)^{-1}, \quad y_0 = (k_1\tau_3)^{-1}.$$

Частота й період коливань обчислюють з рівнянь (5), вони дорівнюють відповідно

$$\omega = (\tau_3\tau_p)^{-1/2}, \quad T = 2\pi(\tau_3\tau_p)^{1/2}.$$

Оцінимо τ_3 й τ_p , виходячи з таких міркувань. Нехай родина із двох зайців у рік приносить приплід із шести зайчат. Тоді час відтворення потомства $\tau_3 = 1/3$ року. Величину середнього часу життя рисей τ_p приймемо такою, що дорівнює 10 рокам. При цьому період коливань популяції складе

$$T = 2\pi \left(\frac{1}{3} 10 \right)^{1/2} \approx 10 \text{ років,}$$

тобто величину близьку до тієї, що спостерігалися в природі.

Амплітуди коливань Δx_m й Δy_m також обчислюють з рівнянь (5). Вони пов'язані між собою співвідношенням

$$\frac{\Delta y_m}{y_0} = \sqrt{\frac{\tau_3}{\tau_p}} \cdot \frac{\Delta x_m}{x_0}.$$

Для наших умов

$$\frac{\Delta y_m}{y_0} \approx 0,2 \frac{\Delta x_m}{x_0}.$$

Так, за відносної амплітуди коливань числа зайців $\Delta x_m/x_0 = 0,5$ маємо $\Delta y_m/y_0 = 0,1$. Це теж узгоджується з результатами спостережень.

Зазначимо, що відповідно до розглянутої моделі період коливань визначається не циклом сонячної активності, а і інтервалами часу τ_3 й τ_p . А яка роль активності Сонця? Вона є одним з основних факторів, що «синхронізують» коливальний процес. За відсутності яких-небудь збурень чисельність зайців і рисей залишалася б незмінною: $x = x_0$ й $y = y_0$.

Модель типу «хижак – жертва» описує взаємодію багатьох популяцій у живій природі. Звичайно, величини параметрів x_0 , y_0 , T , Δx_m й Δy_m у кожному випадку будуть різними. В цілому ж ця модель є універсальною.

3.9. Напрямки вдосконалювання законів математичної біології

Розглянуті вище моделі є дуже спрощеними й звичайно досить грубо описують дійсність, а іноді й взагалі не відповідають результатам спостережень. Із цієї причини можна лише умовно говорити про закони математичної біології, що керують еволюцією біосфери. Ускладнення моделей звичайно приводить до більш адекватного опису розвитку живої природи. У яких напрямках видозмінюються біосферні моделі?

По-перше, враховують залежність використовуваних коефіцієнтів (α , β , τ_1 , τ_2 , k_1 , k_2 й ін.) від шуканих функцій ($x(t)$, $y(t)$ і т. д.). По-друге, залучають більше число рівнянь, що описують зміну їжі, наявність інших популяцій-конкурентів і т. п. По-третє, враховують міграцію організмів у просторі; при цьому в рівняннях, крім похідних за часом, з'являються члени з похідними за координатами. По-четверте, враховують, що коефіцієнти в рівняннях – випадкові функції часу. Видозмінені в такий спосіб моделі є більш складними, але й більш адекватними.

4. Розміри та маси живих організмів

Розмір – фундаментальна характеристика об'єктів. Розмір визначає їхні властивості й особливості процесів, що протікають у них. Розглянемо характерні розміри й відповідні їм маси біоорганізмів. Оцінимо граничні розміри особин у світі рослин і тварин.

4.1. Загальні відомості

Найменший об'єкт у біосфері – біомолекула – має характерний розмір $l \sim 10^{-8}$ м і масу $m \sim 10^{-20}$ кг. У найпростіших одноклітинних організмів (бактерій) довжина $l \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ м, діаметр $d \sim 10^{-7} - 10^{-5}$ м, $m \sim 10^{-18} - 10^{-12}$ кг. Найбільша клітина – яйце страуса – має $l \approx 15$ см й $m \approx 1,5$ кг. Найпротяжніша клітина – нервова – має довжину біля 1 м. Розміри й маси багатоклітинних (комах, плазунів, риб, земноводних, людини, кита й т. п.) змінюються в широких межах: $l \approx 10^{-4} - 30$ м, $m \approx 10^{-5} - 10^5$ кг (табл. 5). Зазначимо, що на сьогодні найбільша тварина на суші – слон, у Світовому океані – блакитний кит. Для першого $m \approx 10^4$ кг, для другого $m \approx 10^5$ кг. Найбільша риба – китова акула – має довжину до 23 м і масу до 20 т.

Жираф має найбільшу висоту – близько 6 м, у той час як висота слона – близько 3 м, а довжина складає 4 – 5 м.

4.2. Світ рослин

Світ рослин значною мірою залежить від географічної широти й від природних умов у певній місцевості. За полярним колом виживають лише деякі види рослин (їх число – кілька сотень). Їхня висота не перевищує 0,1 – 1 м. Найменше дерево – карликова верба – має висоту 5 см. У середніх широтах рослинний світ досить різноманітний (кілька тисяч видів). Висота трав може досягати 1 м, а дерев – 10 – 20 м. Особливо багата флора

Механічні параметри живих об'єктів

Об'єкт	l , м	m , кг	v , м/с	\tilde{v} , с ⁻¹	a , м/с ²	E_k , Дж
Біомолекула	10^{-8}	10^{-20}	10^{-2}	10^6	10^4	10^{-24}
Біополімер (макромолекула)	$3 \cdot 10^{-8}$	10^{-19}	10^{-3}	$3 \cdot 10^4$	10	10^{-25}
Бактерія	10^{-7}	10^{-18}	10^{-4}	10^3	10^{-1}	10^{-26}
Клітина	10^{-7} –	10^{-18} –	10^{-7} –	10^{-5} –	10^{-12} –	10^{-32} –
Комаха	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^3	10^{-1}	10^{-11}
	10^{-4} –	10^{-9} –	10^{-4} –	$1 - 10^2$	10^{-4} –	10^{-13} –
Равлик	10^{-1}	10^{-1}	10		10^2	10
	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}	1	10^{-2}	10^{-7}
Миша	$3 \cdot 10^{-2}$ –	10^{-3} –	1	$10 - 30$	$10 - 30$	10^{-3} –
	10^{-1}	10^{-2}				10^{-2}
Черепаха	$10^{-1} - 1$	$1 - 10^3$	10^{-1}	$1 - 10$	10^{-2} –	10^{-2} –
					10^{-1}	10
Птиця	$10^{-1} - 1$	$10^{-1} - 10$	$1 - 50$	$10 - 10^2$	$10 - 10^3$	10^{-1} –
						10^4
Засць	0,5	5	$10 - 20$	10	$2 \cdot 10^2$ –	10^2 –
					10^3	10^3
Гепард	1 – 2	50	$10 - 30$	10	$10^2 - 10^3$	10^3 –
						10^4
Людина	1,5 – 2	70 – 100	1 – 10	1 – 10	$1 - 10^2$	10^2 –
						10^4
Риба парусник	0,1	1	30	$3 \cdot 10^2$	$10^2 - 10^3$	10^3
Акула	1 – 10	$10 - 10^3$	10	$10 - 10^2$	$10 - 10^2$	10^3 –
						10^5
Бегемот	2	10^3	1 – 5	1 – 2	1 – 10	10^3 –
						10^4
Жирафа	4 – 6	$5 \cdot 10^2$	1 – 10	1 – 2	1 – 10	10^2 –
						10^4
Слон	4 – 5	10^4	1 – 10	1 – 2	1 – 10	10^4 –
						10^6
Кит	30	10^5	10	0.1 – 0.3	1 – 10	10^7

Примітка. Тут l , m , v , $\tilde{v} = v/l$, a , E_k – відповідно розмір (довжина), маса, швидкість, приведена швидкість і кінетична енергія об'єкта.

в тропіках (понад 8000 видів). Рослини тут розташовуються в кілька ярусів. Кожен ярус – своєрідна екологічна ніша.

Висота дерев (наприклад, евкаліптів) досягає 170 – 180 м. Найтовще дерево росте на берегах Амазонки, його діаметр наближається до 12 м. У цих же широтах виростає й найвища трава – бамбук, її висота – до 50 метрів, діаметр – до 16 см, швидкість зростання – близько 1 м за добу.

Закономірності зміни рослинності в гірських областях планети під час піднімання вгору описують законом вертикальної поясності, що його відкрив О. Гумбольдт.

Спитаємо, якою може бути найбільша висота дерев на Земній кулі? Очевидно, що вона залежить від міцності деревини, а також від здатності дерев забезпечувати свою вершину соками. Розглянемо це питання докладніше.

Залежність від міцності деревини.

Масу дерева m визначають маси основного стовбура m_0 і крони $m_1 = \alpha m_0$, залежно від розмірів крони коефіцієнт α змінюється в межах 2 – 4. Отже, $m = m_0(1 + \alpha)$, вага дерева $P = m_0 g(1 + \alpha)$. Вважатимемо, що основний стовбур приблизно можна апроксимувати циліндром з об'ємом $V = Sh$, де S – середня площа перетину стовбура, h – його висота. Тоді

$$P = \rho Shg(1 + \alpha),$$

де $\rho \approx 0,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина деревини. Дерево з вагою P створює тиск на низ стовбура

$$\sigma = \frac{P}{S} = \rho hg(1 + \alpha).$$

Величина σ не повинна перевищувати міцність деревини на стискання σ_{\max} , що дорівнює $(4 - 5) \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. При цьому максимальна висота дерева становить

$$h_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\rho g(1 + \alpha)}.$$

Для $\alpha = 2 - 4$ й $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ маємо $h_{\max} \approx 1 - 2 \text{ км}$. Таким чином, міцність деревини допускає висоту дерева близько 1 – 2 км.

Міцність деревини на ламання на порядок менше. Через це h_{\max} зменшується до 100 – 200 м.

Висота підняття соків.

Висота, на яку можуть підніматися соки дерева, залежить від величини так званого осмотичного тиску $p_{\text{ос}}$, що становить 10^5 – 10^6 Па. З умови рівності гідростатичного тиску $p = \rho gh$ осмотичному тиску одержуємо $h_{\max} = p_{\text{ос}}/\rho g$.

Звідси $h_{\max} \approx 16$ – 160 м, що цілком відповідає результатам спостережень. Таким чином, максимальна висота дерев визначається, насамперед, величиною осмотичного тиску.

4.3. Світ тварин

Для тварин їжею служать рослини (для травоядних) або більш дрібні тварини (для хижаків). Тому зрештою кількість тварин пропорційна масі рослинного світу. У тропіках ярусність рослин сприяє «розселенню» тварин за «поверхами».

Розміри й маса особин змінюються в широких межах. Розглянемо такі приклади.

Найдрібнішою комахою є паразитна оса ($m = 0,006$ г, $l = 0,2$ мм), а найбільшою є африканський жук Голіаф ($m = 110$ г, $l = 12$ см).

До найменших птахів належить колібрі, її маса – 1,6 г, довжина – 5,7 см, до найбільших – альбатрос ($m \sim 10$ кг, довжина близько 1,5 м, розмах крил – до 4,25 м) і страус ($m \approx 140$ кг, висота – біля 2,4 м).

Найменшим сухопутним ссавцем є миша-землерийка, її маса – близько 2 г, довжина – 3,5 см. Наймасивніша тварина на суші – слон ($m \approx 10$ т, довжина – 4 – 5 м, висота – близько 3 м). До найбільш високих тварин належить жираф, його висота понад 6 м.

До найбільш тварин на Землі належить блакитний кит, його маса досягає 190 т, довжина – 33 м. Його родич кашалот здатний поринати на глибину до 3 км, де тиск біля $3 \cdot 10^7$ Па, або 300 атмосфер. Під водою кашалот може перебувати більше 1 години.

Чим визначається мінімальна m_{\min} і максимальна m_{\max} маси теплокровних тварин? Величина m_{\min} обумовлена здатністю особини зберігати тепло. Оскільки її теплова енергія E_T пропорційна масі, а отже й об'єму, тобто l^3 , то під час зменшення l дуже швидко зменшується E_T . Величина m_{\max} обмежена зверху здатністю скелета й м'язів витримувати навантаження. Вся справа в тому, що сила ваги пропорційна масі, а $m \sim l^3$. У той же час припустиме навантаження, що діє на опорно-рухову систему, зростає пропорційно площі її поперечного перерізу, тобто $\sim l^2$. Тому для досить великих l скелет і м'язи просто не впоралися б з навантаженням. Додамо, що з цієї причини великі тварини – повільні (точніше, інертні), а дрібні – рухливі, жваві. Для наочності порівняйте таких тварин, як бегемот і миша.

Міцність скелета.

Одержимо співвідношення, що дозволяє оцінити максимальний розмір тварин. Насамперед він залежить від міцності кісток скелета. Вони витримують вплив сили F за механічної напруги $\sigma = F/S$, що не переважає межу міцності кістки на стискання $\sigma_{\max} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ (S – площа її поперечного перерізу). Цікаво, що для граніту $\sigma_{\max} \approx 10^7 \text{ Н/м}^2$. Таким чином, кістка значно міцніше від граніту. Оскільки в процесі життєдіяльності тварина зазнає значних механічних перевантажень, максимальний розмір тіла визначає не σ_{\max} , а функціональна межа міцності $\sigma_{\phi} \approx 10^7 \text{ Н/м}^2$. Максимальна вага тіла тварини

$$m_{\max} g = \sigma_{\phi} S,$$

де $m_{\max} = \rho V_{\max} = \rho \alpha_1 l_{\max}$, $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$ – середня густина тіла, m_{\max} – його маса, l_{\max} – максимальний розмір, α_1 – безрозмірний коефіцієнт. Площа

$$S = \beta_1 l_{\max}^2,$$

де β_1 – також безрозмірний коефіцієнт. Наприклад, для людини $\alpha_1 \approx (1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$, $\beta_1 \approx (1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$.

Вважатимемо, що принцип фізичної подібності є справедливим, тобто покладемо, що будова тіла всіх ссавців на суші подібна.

Строго кажучи, це не зовсім так, але для оцінок використати принцип подібності цілком виправдано. У цьому випадку для всіх тварин коефіцієнти α_1 й β_1 приблизно такі ж, як і для людини. Підставляючи l_{\max} й S у вихідне рівняння, одержимо

$$\rho g \alpha_1 l_{\max}^3 = \sigma_{\phi} \beta_1 l_{\max}^2.$$

Звідси

$$l_{\max} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \frac{\sigma_{\phi}}{\rho g} \approx 10^{-2} \frac{\sigma_{\phi}}{\rho g}.$$

Для вказаних вище значень σ_{ϕ} й ρ маємо

$$l_{\max} \approx 10^{-2} \frac{10^7}{10^3 \cdot 10} \approx 10 \text{ м.}$$

Отже, скелет сухопутної тварини витримує навантаження, якщо його розмір не перевищує приблизно 10 м.

Міцність кровоносних судин.

Величина l_{\max} залежить не тільки від міцності костей, але й від міцності кровоносних судин. Останні повинні витримувати надлишковий (порівнянно з атмосферним) тиск крові не більше $p_{\max} \approx 350 \text{ мм рт. ст.} \approx 4,6 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Величина гідростатичного тиску

$$p_r = \rho g \Delta h.$$

Тут Δh – максимальне віддалення кінцівок тіла від серця. Оскільки величина тиску крові не повинна перевищувати p_r , то

$$p_{\max} = \rho g \Delta h_{\max},$$

звідси

$$\Delta h_{\max} = \frac{p_{\max}}{\rho g}.$$

Виконуючи обчислення, одержимо $\Delta h_{\max} \approx 5 \text{ м}$. При цьому максимальний розмір $l_0 \approx 2\Delta h_{\max} \approx 10 \text{ м}$, тобто практично збігається з оціненим вище значенням l_{\max} .

Швидкість провідності нервових імпульсів.

Максимальна довжина тіла обмежена також величиною швидкості поширення нервових імпульсів $v \approx 20 \text{ м/с}$. За $l = 10 \text{ м}$ час запізню-

вання реакції організму на вплив $\Delta t \approx 2l/v \approx 1$ с. За такої повільності тварині нелегко вижити.

Таким чином, різні підходи до оцінки l_{\max} дають те саме значення – близько 10 м.

Максимальна маса морської тварини – кита – на порядок перевищує масу найбільшої істоти на суші – слона. Справа в тому, що навантаження на скелет і м'язи кита істотно менше, тому що на нього у воді діє сила Архімеда, яка спрямована вгору й дорівнює за модулем

$$F_A = m_b g \approx mg,$$

де m_b – маса витиснутої води, що приблизно дорівнює масі кита.

Кит, викинутий з якихось причин на берег, як відомо, гине через свою величезну вагу. При цьому його скелет зазнає додаткового навантаження $mg \approx 10^6$ Н.

5. Швидкості та прискорення живих організмів

Розглянемо характерні величини швидкості й прискорень у живій природі. Результати їхньої оцінки наведено в табл. 5.

5.1. Загальні відомості

Найдрібніші об'єкти (біомолекули, біополімери, бактерії) самостійно рухатися не можуть. У деяких одноклітинних з'являються примітивні органи (вії, жгутики), що сприяють переміщенню. У більш складних організмів органи руху розвинені добре.

5.2. Швидкість, прискорення та кінетична енергія

Розглянемо рух найдрібніших об'єктів.

Брунівський рух.

Це явище відкрив Р. Броун (Великобританія) у 1827 р. Рух виликають поштовхи, що їх зазнають зважені в середовищі дрібні

об'єкти з боку навколишніх молекул, які беруть участь у тепловому русі. При цьому зсув мікрооб'єкта за час Δt у середньому дорівнює

$$\Delta R = \sqrt{2D\Delta t}, \quad D = \frac{kT}{6\pi\eta l},$$

де D – коефіцієнт дифузії об'єкта, T – температура середовища, k – стала Больцмана, η – коефіцієнт динамічної в'язкості. Тоді середня швидкість руху

$$v \approx \frac{\Delta R}{\Delta t} = \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}}. \quad (7)$$

Як Δt виберемо час, необхідний для переміщення об'єкта на відстань, що дорівнює його розміру, тобто $\Delta t = l/v$. Тоді з (7) одержимо

$$v = \frac{2D}{l}. \quad (8)$$

Поряд з v уведемо також поняття відносної швидкості $\tilde{v} = v/l$.

Рух найдрібніших об'єктів можуть також викликати перепади тисків, концентрацій і температур.

Оцінка прискорень.

Викладемо міркування, виходячи з яких можна одержати формулу для оцінки прискорень. За прямолінійного руху прискорення дорівнює

$$a \approx \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

де Δv – зміна швидкості за час Δt . Прийmemo далі, що $\Delta v \approx v$, тобто максимальному значенню швидкості для даного руху. Таку швидкість об'єкт набирає за час, близький до $\Delta t \approx l/v$, де, як і вище, l – довжина організму. Тоді

$$a \approx \frac{v^2}{l}. \quad (9)$$

Під час різких поворотів біооб'єкт зазнає також доцентрового прискорення, яке спрямоване по нормалі (тобто перпендикулярно) до траєкторії в кожній її точці й дорівнює за модулем

$$a_n \approx \frac{v^2}{r},$$

де r – радіус дуги, яку він описує. Звичайно $r \approx l$, і $a_n \approx v^2/l$. Таким чином, обидва прискорення за порядком величини збігаються між собою, й далі буде йтися про величину a .

Видно, що $a \sim l^{-1}$, тобто що більше біооб’єкт, то менше його прискорення й то більше проявляється його інертність. Наприклад, прискорення порядку 10^3 , 10^2 , 10 й 1 м/с² здатні розвинути відповідно мураха, миша, людина й слон.

Додамо, що живі організми легко переносять тривалі прискорення $a \leq g$ (g – прискорення вільного падіння) і короткочасні перевантаження за $a \approx (10 - 10^3)g$.

Більших перевантажень зазнає дятел, коли довбає дерево, а також риба-меч під час удару о перешкоду. В обох випадках $a \approx 10^3g$. Важливо, що тварини при цьому зовсім не травмуються.

Результати оцінок.

Знаючи масу об’єкта m і його швидкість v , можна обчислити кінетичну енергію

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (10)$$

Результати оцінок v , \tilde{v} , a й E_k з використанням співвідношень (8) – (10) наведено в табл. 5. Для певності вважали, що біологічні об’єкти з розмірами $l \leq 10^{-6}$ м здійснюють броунівських рух у воді ($\eta \approx 10^{-3}$ Па·с). У повітрі, біля поверхні Землі, величина швидкості броунівського руху приблизно $10^{-1} - 10^{-4}$ м/с для $l \sim 10^{-7} - 10^{-5}$ м. Додамо, що параметри механічного руху істотно залежать від розмірів біооб’єкта ($v \sim l^{-2}$, $a \sim l^{-5}$, $E_k \sim l^{-1}$).

Броунівський рух спостерігаємо лише для об’єктів, розмір яких менше $10^{-6} - 10^{-5}$ м.

З табл. 5 видно, що швидкості броунівського руху дуже малі ($\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ м/с). Більш складні організми, маючи спеціальні органи для переміщення, рухаються швидше. Їхня швидкість може досягати десятків метрів за секунду, а відносна швидкість $v/l - 10^2$ с⁻¹. Велику відносну швидкість мають броунівські частинки, а також деякі комахи, миші, птахи, акули й риба вітрильник.

Деякі «рекордсмени». Великі тварини можуть пересуватися з великою швидкістю. Найшвидкішим на суші є гепард. На коротких дистанціях (у сотні метрів) він розвиває швидкість до 30 м/с. До тихохідних тварин належить садовий равлик ($v \approx 10^{-2}$ м/с). Найшвидшим птахом є стриж-колючехвіст: його швидкість досягає 50 м/с, за день він пролітає близько 900 км. Ще вища швидкість пікірування хижих птахів. Наприклад, сокіл сапсан «каменем падає з неба» зі швидкістю близько 100 м/с.

Птахам незначно поступаються в швидкості комахи. Так, метелик олеандровий бражник пролітає відстань біля 1 000 км із середньою швидкістю 15 м/с, а бабка-вартівник (російською – стрекоза) може летіти зі швидкістю до 40 м/с протягом тривалого часу (обганяє деякі види легких літаків).

І комахи, і птахи, звичайно, поступаються в абсолютній швидкості сучасним літакам. Відносна швидкість v/l у перших, однак, більша. Наприклад, у надзвукового літака $v/l \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$, а в згаданих метеликів і бабок $v/l \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$.

З морських тварин найшвидшим є риба вітрильник, її швидкість становить близько 30 м/с.

Більшість мешканців морів (риби, дельфіни, кити й ін.) для руху використовують плавці й хвіст. Деякі тварини застосовують принцип реактивного руху. При цьому біологічний об'єкт рухається вперед, викидаючи у зворотному напрямку воду. Для збільшення швидкості збільшується число реактивних імпульсів в одиницю часу. Наприклад, кальмар здатний розвинути швидкість до 20 м/с.

5.3. Рух у воді

Будь-яке середовище чинить опір руху. За малої швидкості руху сила опору оцінюють за формулою

$$F \approx 3\pi\eta v l_T, \quad (11)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості води; l_T – ширина або товщина рухомого тіла, яка того ж порядку, що й l .

Наприклад, для інфузорії сила опору

$$F = 3\pi \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-5} \approx 10^{-13} \text{ Н.}$$

Формула (11) застосовна для досить малих швидкостей, за яких число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{vl}{\eta} \rho \leq 10^3. \quad (12)$$

Звідси маємо умову застосовності виразу (11):

$$v \leq \frac{\eta}{\rho l} \text{Re}.$$

Очевидно, що величина v залежить від розміру тіла l . Наприклад, для об'єкта з $l = 1$ см швидкість $v \leq 10^{-1}$ м/с. З такими швидкостями звичайно переміщуються лише найпростіші організми.

Опір середовища руху більш складних біооб'єктів, що рухаються з великими швидкостями, описують наступним співвідношенням:

$$F \approx \frac{C}{2} \rho v^2 d^2, \quad (13)$$

де $C \approx 0,2 - 1$ – коефіцієнт, який залежить від обтічності рухомого тіла, d – діаметр його перетину в площині, перпендикулярній напрямку руху. При цьому $\text{Re} \gg 10^3$. Наприклад, сила опору води під час руху кита зі швидкістю $v = 10$ м/с у припущенні, що $C = 0,4$ (таке значення характерне для автомобіля), дорівнює

$$F = \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 10^3 \cdot 10^2 \cdot 10 \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Потужність, що її витрачає кит на рух, дорівнює

$$P = Fv = 2 \cdot 10^5 \cdot 10 \approx 2 \cdot 10^6 \text{ МВт.}$$

Отримане значення потужності (як і сили) є завищеним. Насправді, завдяки особливій формі кита, яка є обтічною й такою, що пригнічує турбулентність, коефіцієнт $C \approx 0,04$ і реальні значення сили опору та потужності на порядок менше.

Одержимо формулу, щоб оцінити швидкості біооб'єктів, які рухаються самостійно. Для цього припустимо, що потужність тіла P пропорційна його масі або об'єму (це справедливо для екстремального навантаження), тобто

$$P = C_1 V = C_2 d^3.$$

У той же час із урахуванням виразу (13) маємо

$$P = Fv = \frac{C}{2} \rho v^3 d^2.$$

Прирівнюючи праві частини цих співвідношень, одержимо

$$\frac{C}{2} \rho v^3 d^2 = C_2 d^3.$$

Тоді

$$v = \left(\frac{2C_2 d}{C \rho} \right)^{1/3} \equiv C_3 \left(\frac{d}{\rho} \right)^{1/3} = C_4 d^{1/3}.$$

Видно, що $v \sim d^{1/3}$. Коефіцієнт C_3 можна оцінити, знаючи v і d для конкретного об'єкта. Наприклад, для кита $d = 8$ м, $v = 10$ м/с. При цьому $C_3 = 50$ (кг/(м·с³))^{1/3}, $C_4 = 5$ м^{2/3}·с⁻¹.

Відносна швидкість $\tilde{v} = v/d \sim d^{-2/3}$. Зі зростанням d величина \tilde{v} зменшується.

Для прискорення маємо таке співвідношення:

$$a \approx \frac{v^2}{d} = \frac{(C_4 d^{1/3})^2}{d} = C_4^2 d^{-1/3}.$$

Що менше d , то більші a і \tilde{v} .

5.4. Рух у повітрі

Живий світ використовує три форми польоту:

- планерування;
- змахування крилами у вертикальному напрямку;
- змахування крилами в горизонтальному напрямку.

Планерування.

Планерування – найпростіша й економічна форма польоту. Її застосовує низка птахів – ластівка, скопа, альбатрос й ін. Птахи при цьому використовують висхідні потоки повітря, що забезпечують піднімальну силу. Її можна оцінити з формули:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 S,$$

де $\rho \approx 1 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря; v – швидкість потоку; S – площа проекції птаха на площину, перпендикулярну напрямку потоку, вона приблизно дорівнює площі крил. Наприклад, для альбатроса $S \approx 3 \text{ м}^2$, за $v = 10 \text{ м/с}$

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot 3 = 150 \text{ Н.}$$

За маси в кілька кілограмів така піднімальна сила дозволяє йому з найменшими зусиллями годинами кружляти над морем.

Використовуючи висхідні потоки повітря, скопа може пролітати відстані до сотні кілометрів зі швидкістю $\sim 40 \text{ м/с}$, жодного разу не змахнувши крилами.

Планерувати можуть і комахи. Наприклад, бабка, використовуючи конвективні потоки повітря, планерує на висоті 3 – 4 м протягом 3 – 5 хвилин. Зрозуміло, для планеруючого польоту площа крил повинна бути досить великою і потрібні висхідні потоки. Тому цей спосіб польоту комах у чистому вигляді не одержав широкого поширення.

Наведена формула для піднімальної сили й результати її оцінки справедливі для випадку «зависання». Під час непланеруючого польоту виникає піднімальна сила іншої природи, до розгляду якої ми переходимо.

Змахування крилами у вертикальному напрямку.

Другу форму польоту – обтікання крила потоками повітря – використовують практично всі птахи. Цей же принцип лежить в основі польоту літаків. Звичайно, між польотом літака і птаха є й істотна різниця. У літака крила – нерухомі, а в птаха – більш ефективним є політ, коли є крила, що махають. Рухоме крило забезпечує збільшення піднімальної сили й зменшення лобового опору повітря.

Розглянемо докладніше обтікання нерухомого крила потоками повітря. Можливість польоту базується на спеціальній формі

крила, що в перетині являє собою несиметричну фігуру, схематично зображено на рис. 4. Важливо, що довжина її нижньої частини l_1 менша від довжини верхньої частини l_2 .

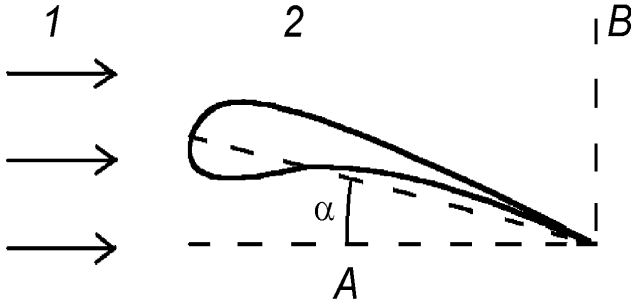


Рис. 4. Принцип польоту – обтікання крила потоком повітря:
1 – потік повітря; 2 – крило в перетині

Тиск газу й швидкості обтікання поверхонь крила пов'язані законом Бернуллі:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2,$$

де індекси 1, 2 стосуються відповідно нижньої й верхньої частин крила.

Обчислимо різницю тисків

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2).$$

Важливо, що $v_2 > v_1$ (бо $l_2 > l_1$), і тоді $p_1 - p_2 > 0$. Ця різниця тисків і спричиняє піднімальну силу, спрямовану вбік убування тиску. Перетворимо вираз у дужках у такий спосіб:

$$(v_2^2 - v_1^2) = (v_2 + v_1)(v_2 - v_1)$$

і введемо швидкість потоку, що набігає,

$$v = \frac{(v_2 + v_1)}{2}.$$

Тоді

$$(v_2^2 - v_1^2) \approx 2v\Delta v, \quad \Delta v = v_2 - v_1.$$

Величина Δv приблизно пропорційна швидкості потоку v :

$$\Delta v = \frac{C}{2}v.$$

де C – коефіцієнт, що залежить від кута атаки (кута α між напрямком потоку повітря й хордою крила, див. рис. 4). Під час польоту звичайно $C \sim 1$. З урахуванням сказаного

$$p_1 - p_2 \approx \frac{C}{2}\rho v^2.$$

Уведемо площу проекції крила на площину A й одержимо співвідношення для піднімальної сили:

$$F = \frac{C}{2}\rho v^2 S_A. \quad (14)$$

Зазначимо, що для сили опору руху формула має подібний вигляд:

$$F_o = \frac{C_1}{2}\rho v^2 S_B. \quad (15)$$

де S_B – площа проекції крила на площину B ; $C_1 \approx 0,1 - 1$ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми об'єкта. Оскільки за $\alpha \ll 1$ величина $S_B \ll S_A$, $F_o \ll F$ (α вимірюють у радіанах).

Оцінімо піднімальну силу для найшвидшого птаха – стрижа-колючехвоста ($v \approx 50$ м/с, $S = 0,05$ м²). Вона дорівнює

$$F \approx \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 50^2 \cdot 0,05 \approx 60 \text{ Н.}$$

Маса птаха – сотні грам, а вага mg – декілька ньютонів. Отже, величина $F \gg mg$. У той же час F_o не перевищує декількох десятих часток ньютона.

Якщо піднімальна сила дорівнює вазі птаха, має місце горизонтальний політ. За $F > mg$ птах набирає висоту, а за $F < mg$ – втрачає її.

Як і під час руху у воді, під час польоту швидкість дорівнює

$$v = \left(\frac{2C_2 d}{C\rho} \right)^{1/3} \equiv C_3 \left(\frac{d}{\rho} \right)^{1/3} = C_4 d^{1/3}.$$

де $C_3 = 50 \text{ (кг/(м}\cdot\text{с}^3))^{1/3}$, $C_4 = 50 \text{ м}^{2/3}\cdot\text{с}^{-1}$, $\rho \approx 1 \text{ кг/м}^3$. Видно, що швидкість $v \sim d^{1/3}$, $\tilde{v} \sim d^{-2/3}$. Це справедливо за $P \sim m \sim d^3$.

Змахування крилами в горизонтальному напрямку.

Третю форму польоту – змахування крилами в горизонтальному напрямку – спостерігаємо в природі порівняно рідко. Так, наприклад, літають колібри. Цей принцип покладено в основу польоту вертольотів. Зрозуміло, крила колібри не роблять повні обороти, вони здійснюють коливальні рухи в горизонтальному напрямку (у більшості птахів – у вертикальному напрямку). Цікаво, що, злегка нахилиючи крила вперед або назад, колібри може змінювати напрямок руху, літати як дзьобом уперед, так і в зворотному напрямку, а також зависати в повітрі.

Теорія польоту колібри (або вертольота) – досить складна, тому обмежимося простішим завданням: з'ясуємо умови, за яких об'єкт «зависає» у повітрі. Це відбувається тоді, коли силу ваги врівноважує сила F , що діє на об'єкт із боку повітря, яке відкидається крилами (або лопатями). Газ, що рухається зі швидкістю v за рахунок реактивного ефекту, створює силу тяги

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v, \quad (16)$$

де Δm – маса повітря, переміщеного за час Δt . Оцінимо Δm у такий спосіб:

$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho S \Delta x = \rho S v \Delta t.$$

Тут ΔV – об'єм цієї маси повітря, S – площа перетину потоку. Тоді

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho S v$$

і з врахуванням (16) для піднімальної сили маємо таке співвідношення:

$$F = \rho v^2 S. \quad (17)$$

Потужність, що її розвиває об'єкт,

$$P = Fv = \rho v^3 S. \quad (18)$$

Для зависання досить, щоб виконувалася умова $F = mg$. Як маємо з (17), при цьому

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\rho S}}.$$

Виконаємо оцінки для колібрі ($m = 2$ г, $S = 30$ см²):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{1 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} \approx 2,5 \text{ м/с},$$

$$F = mg \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ Н}, \quad P = Fv \approx 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}.$$

Цікаво, що під час «зависання» $v \sim l^{1/2}$, $F \sim l^3$ й $P \sim l^{7/2}$.

Для переходу від режиму «зависання» до режиму польоту потрібно, щоб $F > mg$. Цікаво, що колібрі, як і вертоліт, злітають без розгону.

Завершуючи розгляд руху в повітрі, назвемо деяких крилатих «рекордсменів». Довше за всіх перебувати в повітрі може птах стриж, він навіть спить і парується в повітрі. Стриж-колючехвіст – найшвидший, його швидкість може досягати 50 м/с. Сокіл-сапсан пікірує зі швидкістю 75 – 100 м/с. Найдальше за всіх птахів літає полярна крачка, вона щорічно здійснює переліт з Арктики в Антарктику й назад (відстань близько 40 000 км). Відомий випадок, коли зграя чибісів перетнула Атлантичний океан, здолавши при цьому за добу відстань близько 4 000 км. В іншому знаменитому перельоті золотавих сивок за 100 годин було переборено дистанцію в 10 000 км. Очевидно, що в обох випадках птахам допомагав попутний вітер. Про переваги альбатроса й колібрі ми згадували вище.

Природа подбала про те, щоб літаючі біооб'єкти були максимально пристосовані для польотів. Пір'ям птахів властива міцність і легкість, їхні кістки – порожні, іноді із твердими розпірками. Скелет має необхідну міцність і твердість, він найбільш міцний у грудній частині. Часто скелет птахів важить менше, ніж пір'я.

Здатність літати залежить також від частоти змахів крилами. Так, наприклад, великий птах (пелікан, могильник) за секунду робить один – два змахи, горобець – близько 10 змахів, 80

колібрі – до 80 змахів, бджола – 200 – 450 змахів, а комар – біля 300 – 600 змахів.

5.5. Швидкість бігу

Одержимо формулу для оцінки швидкості бігу. Нехай тварина рухається з постійною швидкістю v . Тоді кінетична енергія його ніг масою m_n становить $E_n = m_n v^2 / 2$ і дорівнює роботі A , що її виконують м'язи. Остання пропорційна добутку сили м'язів $F_M = f_M S_M$ і довжини їхнього скорочення Δl_M , тобто $A = f_M \cdot S_M \cdot \Delta l_M$. Тут $f_M = 3 - 4$ кН/м² – питома сила м'яза, $S_M \sim l^2$ – площа м'яза, $\Delta l_M \approx 0,3l_M$, $l_M \sim l$ – його довжина. Оскільки $A \sim S_M l_M \sim m_M$ (m_M – маса м'яза), наближена формула для швидкості бігу має вигляд

$$v = \sqrt{\frac{m_M f_M}{m_n \rho}},$$

де $\rho \approx 10^3$ кг/м³ – густина тіла.

Наведемо приклади. Гепард має масивні м'язи й худі ноги ($m_M/m_n \approx 2$). Його швидкість наближається до 30 м/с. У вовка й зайця $m_M \approx m_n$, $v \approx 20$ м/с. Людина – поганий бігун, його рух забезпечують м'язи, зосереджені в ногах. Для нього $m_M \approx m_n/4$, а швидкість $v \approx 10$ м/с.

Розглянемо прискорення тварини. Відповідно до другого закону Ньютона

$$a = \frac{F}{m},$$

де F – сила м'язів. За умови застосовності принципу фізичної подібності $F = C_1 l^2$. Тоді з врахуванням того, що $m = C_2 l^3$, маємо

$$a \approx \frac{C_1 l^2}{C_2 l^3} = \frac{C_3}{l} = C_4 m^{-1/3},$$

тобто прискорення залежить від маси й розмірів тіла. Наприклад, людина за час 2,5 с здатна розвинути швидкість 10 м/с. При цьому $a \approx 4$ м/с², $C_3 \approx 7$ (м/с)², $C_4 \approx 17$ м · кг^{1/3} · с⁻².

Зазначимо, що швидкість бігу не залежить від розмірів і маси тварини, а швидкість плавання й польоту помітно залежить від них ($v \sim d^{1/3} \sim m^{1/9}$). Під час бігу прискорення $a \sim l^{-1} \sim m^{-1/3}$, а під час плавання й польоту $a \sim l^{-1/3} \sim m^{-1/9}$. Це можна пояснити різницею у механізмах енерговитрат (див. підрозділ 6.4).

6. Енергія та потужність живих організмів

У цьому розділі оцінимо й порівняємо енергії та потужності різних живих об'єктів.

6.1. Загальні відомості

Кожен живий об'єкт – відкрита термодинамічна система. Він споживає енергію від Сонця або одержує перетворену сонячну енергію з їжею. В останньому випадку енергія міститься в хімічних сполуках органічних молекул. У будь-якому живому організмі відбуваються процеси перетворення енергії. Вивільнена хімічна енергія трансформується в електричну (яка забезпечує передачу інформації з нервових волокон) і механічну (яка регулює роботу серця, м'язів). В остаточному підсумку всі види енергії переходять у теплову енергію. Завдяки їй підтримується температура тіла, відбувається потовиділення, виникає теплове випромінювання живого об'єкта.

Розглянемо ці види енергії докладніше.

6.2. Споживана енергія та потужність

Споживану енергію E_c визначають за масою їжі m_p та її питомою енергетичною здатністю q_c :

$$E_c = q_c m_c. \quad (19)$$

Орієнтовно можна вважати, що для рослинної їжі значення $q_c \approx 10^6$ Дж/кг, для тваринної – $q_c \approx 10^7$ Дж/кг.

Споживаній енергії відповідає потужність

$$P_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta t} = q_c \frac{\Delta m_c}{\Delta t}, \quad (20)$$

де $\Delta m_c/\Delta t$ – середня швидкість споживання їжі. Її величина залежить від об'єкта. Так, для бактерій $\Delta m_c/\Delta t \approx 10^{-21}$ кг/с, для людини – $3 \cdot 10^{-5}$ кг/с, для Кита – 10^{-1} кг/с.

Результати оцінок E_c та P_c по формулах (19), (20) наведено в табл. 6. (Вважали, що $\Delta t = 1$ доба $\approx 10^5$ с.) Видно, що ці параметри зростають зі збільшенням розмірів (маси) живих об'єктів.

6.3. Теплова енергія

Теплова або внутрішня енергія залежить від маси об'єкта і його абсолютної температури:

$$E_t = C m T,$$

де $C \approx 4 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) – питома теплоємність об'єкта, вона близька до питомої теплоємності води. Для холонокровних організмів T визначають температурою середовища перебування. Для теплокровних об'єктів (птахів, ссавців) звичайно $T \approx 300 - 310$ К ($t \approx 30 - 40$ °С).

Результати оцінок E_t також наведено в табл. 6. Природно, що зі зростанням розмірів організмів збільшується їхня теплова енергія.

6.4. Механічна потужність

Механічна енергія затрачається на виконання механічної роботи (скорочення м'язів серця, переміщення в просторі, переміщення вантажів і т. д.).

У механічну енергію E_m перетворюється частина хімічної енергії, яку організм одержує, споживаючи їжу. ККД перетворення дорівнює

$$\eta = \frac{P_m}{P_c},$$

Таблиця 6

**Орієнтовні значення енергетичних параметрів
живих об'єктів**

Об'єкт	E_c , Дж	P_c , Вт	E_t , Дж	Δt_{ox} , с
Бактерія	10^{-10}	10^{-15}	10^{-12}	—
Клітина	$10^{-10} - 10^4$	$10^{-15} - 10^{-1}$	$10^{-12} - 10^3$	—
Комаха	$10^{-3} - 10^5$	$10^{-8} - 1$	$10^{-3} - 10^5$	—
Равлик	10^3	10^{-2}	10^3	—
Миша	$10^3 - 10^4$	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10^3 - 10^4$	$10^5 - 10^6$
Черепаша	$10^4 - 10^7$	$10^{-1} - 10^2$	$10^6 - 10^9$	$10^7 - 10^8$
Птиця	$10^4 - 10^6$	$10^{-1} - 10$	$10^5 - 10^7$	10^6
Засць	10^6	10	$5 \cdot 10^6$	10^6
Гепард	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$
Людина	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^2$	10^8	10^7
Риба вітрильник	10^6	10	10^6	—
Акула	$10^4 - 10^8$	$10^{-1} - 10^3$	$10^7 - 10^9$	—
Бегемот	10^7	10^2	10^9	10^8
Жираф	$10^7 - 10^8$	$10^2 - 10^3$	$5 \cdot 10^8$	10^7
Слон	10^9	10^4	10^{10}	10^8
Кит	10^{10}	10^5	10^{11}	10^8

Таблиця 6 (продовження)

Об'єкт	E_m , Дж	P_m , Вт	E_v , Дж	P_v , Дж
Бактерія	—	—	—	—
Клітина	$10^{-11} - 10^3$	$10^{-16} - 10^{-2}$	—	—
Комаха	$10^{-4} - 10^4$	$10^{-9} - 10^{-1}$	—	—
Равлик	10^2	10^{-3}	—	—
Миша	$10^2 - 10^3$	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^3 - 10^4$	$10^{-2} - 10^{-1}$
Черепаша	$10^3 - 10^6$	$10^{-2} - 10$	$10^4 - 10^6$	$10^{-1} - 10$
Птиця	$10^3 - 10^5$	$10^{-2} - 1$	$10^4 - 10^6$	$10^{-1} - 10$
Засць	$(2 - 3) \cdot 10^5$	2 - 3	$10^5 - 10^6$	1 - 10
Гепард	$(4 - 6) \cdot 10^6$	40 - 60	10^7	10^2
Людина	$(3 - 10) \cdot 10^6$	30 - 100	10^7	10^2
Риба вітрильник	10^5	1	—	—
Акула	$10^3 - 10^7$	$10^{-2} - 10^2$	—	—
Бегемот	$10^7 - 10^8$	$10^2 - 10^3$	10^7	10^2
Жираф	$10^7 - 10^8$	$10^2 - 10^3$	$10^6 - 10^7$	1 - 10^2
Слон	$10^8 - 10^9$	$10^3 - 10^4$	10^8	10^3
Кит	$10^9 - 10^{10}$	$10^4 - 10^5$	10^9	10^4

де P_M – механічна потужність. Звичайно η становить кілька десятків відсотків, для людини $\eta \approx 20 - 30 \%$. Для порівняння зазначимо, що ККД фотосинтезу – близько 75% , а ККД біоломінесценції досягає 90% (див. підрозділ 7.5).

Результати оцінок E_M , P_M наведено в табл. 6. При цьому вважали, що для живих об'єктів (крім людини) $\eta \approx 0,1$. Оцінки E_M виконано для інтервалу часу $\Delta t \approx 10^5$ с.

Зупинимося докладніше на механічній потужності людини. Наведене в табл. 6 значення $P_M \approx 30 - 40$ Вт відповідає потужності людини, що відпочиває, під час ходьби $P_M \approx 80$ Вт, під час важкої фізичної роботи $P_M \approx 150 - 200$ Вт. Спринтер, стрибун і штангіст на коротких інтервалах часу здатні розвивати потужність до $1 - 10$ кВт (табл. 7).

Таблиця 7

Орієнтовні значення механічної потужності людини

Вид діяльності	P_M , Вт	Δt , с	E_M , Дж
Відпочинок пасивний	30 – 40	$2 \cdot 10^4$	$(6 - 8) \cdot 10^5$
Ходьба	75	$2 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^6$
Їзда на велосипеді	100	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^6$
Альпінізм	150	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$
Копання землі	150 – 200	$2 \cdot 10^4$	$(3 - 4) \cdot 10^6$
Плавання	$6 \cdot 10^2$	50	$3 \cdot 10^4$
Біг спринтера	700	10	$7 \cdot 10^3$
Штовхання штанги	$4 \cdot 10^3$	0,5	$2 \cdot 10^3$
Стрибки у висоту	$6 \cdot 10^3$	0,15	$9 \cdot 10^2$

Пішохід.

Оцінимо потужність, що її розвиває пішохід. Під час ходьби частина енергії ΔE_{M1} і потужність P_{M1} затрачаються на підняття центра ваги тіла вагою mg на висоту Δh протягом часу $\Delta t_1 = l/v$ (l – довжина кроку, v – швидкість пішохода):

$$\Delta E_{M1} = mg\Delta h, \quad P_{M1} = \frac{\Delta E_{M1}}{\Delta t_1} = mgv \frac{\Delta h}{l}. \quad (21)$$

Вважаючи, що $m = 70$ кг, $v = 5$ км/год $\approx 1,4$ м/с, $l = 0,6$ м, $\Delta t_1 = 0,4$ с й $\Delta h = 0,03$ м, одержимо:

$$\Delta E_{M1} \approx 70 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{-2} \approx 20 \text{ Дж}, \quad P_{M1} \approx \frac{20}{0,4} \approx 50 \text{ Вт.}$$

Інша частина енергії й потужності витрачається на прискорення ніг. За маси ніг Δm маємо:

$$\Delta E_{M2} = \frac{1}{2} \Delta m v^2, \quad P_{M2} = \frac{\Delta E_{M2}}{\Delta t_1} = \frac{1}{2} \Delta m \frac{v^3}{l}, \quad (22)$$

де E_{M2} – зміна кінетичної енергії ступні за час Δt_1 . За умови $\Delta m = 10$ кг одержимо $\Delta E_{M2} \approx 10$ Дж, $P_{M2} \approx 25$ Вт.

Частину механічної потужності людина затрачає на подолання сили опору повітря (див. 13):

$$P_{M3} = \frac{C}{2} \rho v^3 S, \quad (23)$$

де $\rho \approx 1$ кг/м³ – густина повітря, S – площа перетину людини, $C \approx 0,1 - 1$ – коефіцієнт, що залежить від обтічності тіла. За умови $S \approx 0,5$ м², $C \approx 0,5$ маємо

$$P_{M3} = \frac{0,5}{2} \cdot 1 \cdot 1,4^3 \cdot 0,5 \approx 0,35 \text{ Вт.}$$

Видно, що $P_{M1}, P_{M2} \gg P_{M3}$. Тоді $P \approx P_{M1} + P_{M2} \approx 75$ Вт. Важливо, $P_{M1} \sim v$, а $P_{M2}, P_{M3} \sim v^3$.

Бігун.

Під час бігу людина витрачає потужність, яку можна обчислити зі співвідношень (21), (22) і (23). Повна потужність $P = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3}$. Оцінімо P для спортсмена, що бігає на довгі дистанції (стаєра). За $l = 1$ м, $v = 6$ м/с, прискорювальної маси $\Delta m = 2$ кг й $C \approx 0,5$ маємо:

$$P = 70 \cdot 10 \cdot 6 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-2}}{1} + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \frac{6^3}{1} + \frac{0,5}{2} \cdot 1 \cdot 6^3 \cdot 0,5 \approx 126 + 216 + 27 \approx 370 \text{ Вт.}$$

Для спринтера, що бігає на короткі дистанції, $v = 10$ м/с, $\Delta h \approx 1,5$ см, $\Delta m = 1$ кг. Тоді

$$P = 70 \cdot 10 \cdot 10 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{1} + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{10^3}{1} + \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{2} \approx 105 + 500 + 125 \approx 730 \text{ Вт.}$$

Видно, що в обох випадках головну роль відіграють витрати на прискорення ступень ніг, але величина прискорювальної маси за рахунок зміни техніки бігу зменшується.

Велосипедист.

Велосипедист затрачає потужність на подолання сил тертя катання F_T й опору повітря F_o :

$$P = F_T v + F_o v = k_T mgv + \frac{C}{2} \rho v^3 S,$$

де k_T – коефіцієнт тертя, m – маса велосипеда й людини. За $v = 18$ км/год = 5 м/с, $k_T = 2 \cdot 10^{-2}$, $S \approx 0,5$ м² й $m = 100$ кг маємо

$$P = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 10 \cdot 5 + \frac{0,5}{2} \cdot 1 \cdot 5^3 \cdot 0,5 \approx 100 + 16 \approx 116 \text{ Вт.}$$

Під час руху поганою дорогою k_T збільшується, а v зменшується.

Альпініст.

Альпініст за 1 годину піднімається на висоту 500 м, при цьому $\Delta h / \Delta t \approx 0,15$ м/с. Тоді для $m = 100$ кг, $\Delta t = 7$ год із формули (21) маємо:

$$\Delta E_M = 10^2 \cdot 10 \cdot 3,5 \cdot 10^3 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Дж,}$$

$$P_M = 10^2 \cdot 10 \cdot 0,15 = 150 \text{ Вт.}$$

Землекоп.

Землекоп затрачає енергію на руйнування ґрунту, підняття лопати, маси ґрунту й центра ваги свого тіла. Переміщення останнього виявляється найбільш істотним. Значення P_M при цьому можна оцінити з формули (21) для $\Delta h = 0,1$ м, $\Delta t = 0,5$ с:

$$P_M = 70 \cdot 10 \cdot \frac{0,1}{0,5} = 140 \text{ Вт.}$$

Плавець.

Основну частину потужності пловець витрачає на підняття тіла на величину $\Delta h = 0,3$ м під час кожного кидку вперед (стиль

плавання – брас). Скориставшись формулою (21), де $\Delta t_1 = 0,5$ с, за $v = 2$ м/с одержимо

$$P_{m1} = 70 \cdot 10 \cdot \frac{0,3}{0,5} = 420 \text{ Вт.}$$

Як і спринтер, плавець також затрачає значну енергію на подолання сили опору середовища (води), що можна обчислити з формули, аналогічній співвідношенню (13):

$$F = \frac{C}{2} \rho v^2 S,$$

де S – площа поперечного переріза плавця, $C \approx 0,1 - 1$ – коефіцієнт, що залежить від обтічності тіла. Приймаючи $v = 2$ м/с, $S \approx 0,1$ м², $C = 0,5$, одержимо

$$F = \frac{0,5}{2} \cdot 10^3 \cdot 2^2 \cdot 0,1 \approx 100 \text{ Н.}$$

Тоді

$$P_{m2} = Fv = 100 \cdot 2 = 200 \text{ Вт.}$$

Видно, що величини P_{m1} й P_{m2} – зрівнянні. Повна потужність дорівнює приблизно 620 Вт.

Штангіст.

Звернемося тепер до штангіста, що піднімає штангу масою $m = 200$ кг на висоту $\Delta h = 1$ м за час $\Delta t_1 = 0,5$ с. Як впливає зі співвідношення (21),

$$P_m = 200 \cdot 10 \cdot \frac{1}{0,5} = 4 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Таким чином, у розглянутих прикладах штангіст розвиває найбільшу потужність, але тільки протягом дуже короткого часу (близько 0,5 с). Ця потужність становить приблизно чотири кіловати.

Стрибун.

До штангіста за своїми можливостями наближається спортсмен, що спеціалізується на стрибках у висоту.

Розглянемо це питання докладніше. Присідаючи на $\Delta h \approx 0,3$ м, за час Δt стрибун надає своєму тілу таких швидкостей і прискорень:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad a = \frac{v^2}{2\Delta h} = g \frac{h}{\Delta h},$$

де $h \approx 1$ м – висота підняття центра ваги, що приблизно дорівнює різниці у висотах планки й центра ваги спортсмена під час розбігу. Чисельні оцінки дають:

$$v = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 1} \approx 4,5 \text{ м}, \quad a = 10 \frac{1}{0,3} \approx 30 \text{ м/с}^2, \quad \Delta t = \frac{v}{a} \approx \frac{4,5}{30} \approx 0,15 \text{ с.}$$

Сила, що викликала прискорення, дорівнює

$$F = ma = 70 \cdot 30 = 2,1 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

З урахуванням ваги спортсмена повна сила його ніг становить

$$F_{\text{п}} = ma + mg = m(a + g) \approx 70 \cdot (30 + 10) = 2,8 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

При цьому механічна потужність людини дорівнює

$$P = F_{\text{п}} v_{\text{ср}} \approx \frac{1}{2} F_{\text{п}} v,$$

де $v_{\text{ср}}$ – середня швидкість. Тоді

$$P = \frac{1}{2} \cdot 2,8 \cdot 10^3 \cdot 4,5 = 6,3 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Потужність серця людини.

Для порівняння оцінимо потужність серця людини. Скорочуючись у середньому 60 разів за хвилину, воно проганяє кров об'ємом близько 5 л і масою близько 5 кг. Це відповідає швидкості перекачування маси крові

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \approx \frac{5}{60} \approx 8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с.}$$

При цьому артеріальний тиск становить $(1,3 - 1,9) \cdot 10^4$ Па, а венозний – $(0,6 - 1) \cdot 10^4$ Па, різниця тисків Δp – близько 10^4 Па. Обидва тиски є надлишковими, бо їх відраховують від атмосферного тиску.) Різниця тисків відповідає швидкості v викидання крові серцем. Із закону Бернуллі маємо, що

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2,$$

де $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$ – густина крові. Звідси

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{10^3}} \approx 4,5 \text{ м/с.}$$

Тоді потужність серця

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} v^2 \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\rho} \frac{\Delta m}{\Delta t},$$

де $\Delta E = \Delta m v^2 / 2$ – кінетична енергія крові масою Δm .

Отже, потужність й енергія, затрачувані серцем на одне скорочення, дорівнюють:

$$P = \frac{10^4}{10^3} \cdot 8 \cdot 10^{-2} \approx 1 \text{ Вт}, \quad E = P \Delta t = 1 \cdot 1 \text{ Дж.}$$

Під час виконання важкої фізичної роботи $P \approx 10 \text{ Вт}$, $E \approx 3 \text{ Дж}$.

Таким чином, потужність серця – відносно невелика. За добу воно, скорочуючись 10^5 разів, переганяє кров масою приблизно $8 \cdot 10^3 \text{ кг}$.

6.5. Потужність теплового випромінювання

Будь-яке тіло з температурою $T > 0$ є джерелом електромагнітного випромінювання, яке називають тепловим. Для абсолютно чорного тіла густину потоку енергії випромінювання задають законом Стефана – Больцмана (див. формулу (6.1)):

$$I = \sigma T^4,$$

де $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Інтенсивність випромінювання живих об'єктів й абсолютно чорного тіла трохи відрізняються, тому що перші є «сірими». Крім того, наявність покриву на живому організмі викликає зменшення величини I . Уведемо коефіцієнт ефективності $k_e < 1$, що буде враховувати ці фактори. Закон Стефана – Больцмана набуде такого вигляду:

$$I = k_e \sigma T^4.$$

Якщо S – площа поверхні об'єкта, то потужність, яку воно випромінює, дорівнює

$$P = IS = k_c \sigma T^4 S.$$

Далі врахуємо, що живий організм перебуває в середовищі з температурою T_c . Випромінювання середовища передає об'єкту потужність, що дорівнює

$$P_{bc} = k_c \sigma T_c^4 S.$$

Оскільки для холоднокровних істот $T = T_c$, а отже, $P = P_c$, обміну енергією із середовищем не відбувається. Теплокровні організми випромінюють потужність

$$P_b = P - P_{bc} = k_c \sigma (T^4 - T_c^4) S.$$

Завжди $\Delta T = T - T_c \ll T_c$. Тому

$$P_b \approx 4k_c \sigma T^3 \Delta T S.$$

Наприклад, для одягненої людини за $k_c \approx 0,7$, $T = 310$ К, $\Delta T = 8$ К, $S = 1,5$ м². Тоді маємо

$$P_b \approx 4 \cdot 0,7 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 310^3 \cdot 8 \cdot 1,5 \approx 57 \text{ Вт.}$$

Результати оцінок P_b для $k_c = 0,5$ наведено в табл. 6. Там же зазначено й енергію випромінювання E_b за добу (10^5 с).

Знаючи запас теплової енергії E_t і потужність випромінювання P_b , можна ввести час охолодження живого об'єкта за рахунок випромінювання

$$\Delta t_{ox} = \frac{E_t}{P_b}.$$

Наприклад, для людини в літню пору ($\Delta T = 20$ К) за $P_b = 100$ Вт й $E_t = 10^8$ Дж маємо $\Delta t_{ox} = 10^6$ с ≈ 10 діб. У зимовий час ($\Delta T = 60$ К), $P_b \approx 300$ Вт й $\Delta t_{ox} \approx 3$ доби. Реально ж Δt_{ox} набагато менше, тому що охолодження всього організму навіть на 3 – 4 К є неприйнятним. У цьому випадку за $\Delta t = 4$ К зміна теплової енергії

$$\Delta E_t = Cm\Delta T \approx 4 \cdot 10^3 \cdot 70 \cdot 4 \approx 1,1 \cdot 10^6 \text{ Дж,}$$

а $\Delta t_{ox} = \Delta E_t / P_b \approx 1 - 3$ години для зимових і літніх умов. Приблизно за такий час температура тіла знижується на 4 К, коли зупиняються (або сильно вповільнюються) хімічні реакції в організмі.

Нарешті, виходячи із закону Віна (див. формулу (6.2)), оцінимо довжину електромагнітної хвилі, на яку доводиться максимум інтенсивності випромінювання. Вважаючи $T \approx 300$ К, одержимо

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \approx \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^2} \approx 10^{-5} \text{ м.}$$

Таке значення довжини хвилі відповідає інфрачервоному діапазону.

На закінчення додамо, що перенесення тепла здійснюється також за рахунок теплопровідності, конвекції й адвекції (тобто вітру). Якщо перший механізм – малоістотний, то інші можуть бути відчутними й навіть більш важливими, ніж теплове випромінювання.

6.6. Потужність випаровування

Явище випаровування води живими організмами – одне з найважливіших у природі. Випаровування супроводжується охолодженням об'єкта, завдяки чому виключено перегрівання і навіть смерть організму.

Розглянемо спочатку випаровування води рослинами. Знаючи питому теплоту випаровування q_v , швидкість випаровування $\Delta m/\Delta t$, одержимо потужність випаровування:

$$P_v = q_v \frac{\Delta m}{\Delta t},$$

де $q_v \approx 2 \cdot 10^6$ Дж/кг. Результати оцінок P_v , $\Delta m/\Delta t$ і відповідної енергії E_v за вегетаційний період $\Delta t_0 \approx 2 \cdot 10^7$ с і за добу \tilde{E}_v , а також площі S_1 , що займає одна рослина, наведено в табл. 8.

Розглянемо випаровування води тваринами. Інтенсивність випаровування залежить від їхньої рухливості, волосяного покриття, кількості пор, площі поверхні тіла S .

Людина, що відпочиває, випаровує близько 100 г поту за годину, тобто $\Delta m/\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-5}$ кг/с. За важкої роботи $\Delta m/\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Тоді потужність, затрачена на потовиділення, дорівнює

$$P_v = q_v \frac{\Delta m}{\Delta t},$$

**Орієнтовні значення параметрів,
пов'язаних з випаровуванням води рослинами**

Рослина	$S_1, \text{м}^2$	$\frac{\Delta m_1, \text{кг}}{\Delta t, \text{с}}$	$P_{в1}, \text{Вт}$	$E_{в1}, \text{Дж}$	$\tilde{E}_в, \text{Дж}$	n	$P_в, \text{Вт}$	$E_в, \text{Дж}$
Трави	10^{-3}	10^{-8}	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$	10^7	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{12}$
Зернові злаки	10^{-2}	10^{-7}	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^6$	10^6	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{12}$
Кукурудза	0,16	$5 \cdot 10^{-6}$	10	10^6	$2 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^5$	10^{13}
Соняшник	0,16	$5 \cdot 10^{-6}$	10	10^6	$2 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^5$	10^{13}
Капуста	0,16	$8 \cdot 10^{-6}$	16	$1,6 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^4$	10^6	$2 \cdot 10^{13}$
Листяне дерево	10	10^{-3}	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{10}$	10^3	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{13}$

Примітка. Величини з індексом 1 стосуються однієї рослини, без індексу – до 1 га; n – число рослин на площі в 1 га.

де $q_в \approx 2,4 \cdot 10^6$ Дж/кг, становить $\sim 70 - 500$ Вт. Площа поверхні тіла людини $S \approx 2 \text{ м}^2$. При цьому густина потоку енергії

$$P_в = \frac{P_в}{S} \approx 35 - 250 \text{ Вт/м}^2.$$

Для інших тварин будемо вважати, що $p_в$ такого ж порядку. Величина $P_в$ буде залежати від площі поверхні тіла тварини. Результати оцінок $P_в$, S і відповідної енергії за добу $\tilde{E}_в$ наведено в табл. 9. Менше значення стосується стану спокою, а більше – стану руху.

З таблиці видно, що величина потужності випаровування змінюється від 10^{-5} Вт для комах до 10^5 Вт для китів.

6.7. Баланс енергій людини

Розглянемо добовий баланс енергій.

Нехай людина на виконання роботи протягом робочого дня ($\Delta t_1 = 8$ год) затрачає потужність $P_1 = 100$ Вт. Їй відповідає енергія

**Орієнтовні значення параметрів,
пов'язаних з випаровуванням води тваринами**

Тварина	$S, \text{ м}^2$	$P_{\text{в}}, \text{ Вт}$	$\tilde{E}_{\text{в}}, \text{ Дж}$
Равлик	10^{-4}	10^{-2}	10^3
Миша	10^{-3}	10^{-1}	10^4
Заєць	10^{-1}	$10 - 10^2$	$10^6 - 10^7$
Лисиця	$2 \cdot 10^{-1}$	$20 - 2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$
Гепард	$5 \cdot 10^{-1}$	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^8$
Тигр	1	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^8$
Людина	2	$(0,5 - 2,5) \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^7$
Жираф	3	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^8$
Слон	10	$10^3 - 10^4$	$10^8 - 10^9$

Примітка. Комахи, птахи, черепахи, риби, бегемоти та кити воду майже не випаровують.

$E_1 \approx 2,9 \cdot 10^6$ Дж. Під час відпочинку ($\Delta t_2 = 16$ год) механічна потужність становить близько 50 Вт, а енергія $E_2 \approx 2,9 \cdot 10^6$ Дж. З відходами життєдіяльності втрачається енергія, що приблизно на $E_3 \approx 10^6$ Дж перевищує теплову енергію споживаних їжі, води й повітря. На потовиділення людина затрачає енергію

$$E_4 = q_{\text{в}} \left(\left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right)_1 \Delta t_1 + \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right)_2 \Delta t_2 \right),$$

де $q_{\text{в}}$ – питома теплота випаровування, $(\Delta m/\Delta t)_1$, $(\Delta m/\Delta t)_2$ – швидкості випаровування під час роботи й відпочинку.

Підсумовування енергій E_1 , E_2 , E_3 , E_4 й $E_{\text{в}} \approx 3 \cdot 10^6$ Дж дає значення $E \approx 2,8 \cdot 10^7$ Дж, а середня потужність при цьому становить 320 Вт. Механічний ККД людини дорівнює $\eta \approx (E_1 + E_2)/E \approx 21$ %. Енергетичні витрати компенсуються прийомом їжі. Людина споживає близько 2 кг їжі, 2 л води й 25 кг повітря за добу.

7. Електромагнітні явища в живій природі

Живі об'єкти відносять до макросвіту, де головними силами є електромагнітні. Більше того, організми на 70 – 75 % складаються з електроліту (кров, лімфа, соки, рідини). Не дивно, що електромагнітні процеси відіграють важливу роль у живій природі. У цьому розділі розглянуто лише електромагнітні процеси, внутрішньо властиві біооб'єктам.

7.1. Загальні відомості

Джерелом біострумів є клітини, у яких виникають біопотенціали за рахунок розділення зарядів іонів. Ці потенціали формують електричний потенціал тканин і всього організму, а отже, і його електричне поле. Наявність біострумів зумовлює генерацію магнітного поля. За своїм рівнем останнє набагато слабкіше від електричного поля. Тому магнітні ефекти вивчено погано. Електричні поля тварин допомагають їм полювати, відлякувати хижаків, здійснювати локацію й навігацію.

Дотепер йшлося про порівняно низькочастотні поля, які часто називають квазістатичними або просто статичними. Разом з тим живі об'єкти, що мають температуру вищу від температури навколишнього середовища, передають їй тепло шляхом електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі близько 10^{-5} м і частотою близько $3 \cdot 10^{13}$ Гц (див. підрозділ 6.5). Потужність такого (теплого або інфрачервоного) випромінювання – значна. Коли фахівці говорять про біополе, звичайно під ним розуміють це електромагнітне випромінювання.

Іноді до біополя також відносять акустичне випромінювання живих об'єктів.

Зовсім не беруть до уваги біогравітаційне поле, оскільки воно дуже слабке навіть для найбільших тварин.

Слід зазначити, що теплове випромінювання – досить широкомугове, тому його спостерігають на частотах як менше $3 \cdot 10^{13}$ Гц, так і більше цих значень. Звичайно, потужність випромінювання при цьому менша, ніж потужність інфрачервоного випромінювання.

Деякі тварини й людина є також джерелом електромагнітного випромінювання зі значно більшою частотою – порядку 10^{15} Гц ($\lambda \sim 10^{-7} - 10^{-6}$ м). За рахунок цього вони світяться. Світло таких біооб'єктів холодне, воно не пов'язане з тепловим випромінюванням, розглянутим у підрозділі 6.5.

7.2. Біоелектрика

У 1780 р. Л. Гальвані зробив висновок, що тваринам притаманна електрика. Пізніше М. Фарадей довів тотожність «тваринної» і звичайної електрики.

Біоелектрика – це напрямок у науці, що вивчає електричні процеси, пов'язані з власним полем живого об'єкта. Реакції біоорганізмів на зовнішні електричні поля досліджує електробиологія (електромагнітна біологія, про це див. підрозділ 9.4).

Відома ціла низка риб, що є своєрідними генераторами статичної (або точніше квазістатичної) електрики. До них відносять ската, електричного ската, електричного вугра, електричного сома, гімнарха, звіддаря й ін. Різниця потенціалів $U_0 \approx 50 - 600$ В у них звичайно виникає між хвостом і головою, а в звіддаря – між нижньою й верхньою частинами голови. Статична електрика служить трьом цілям: для полювання (жертву паралізує електричний розряд), для відлякування ворогів, для навігації й локації.

Найбільшу різницю потенціалів (близько 600 В) створює вугор-електрофорус, тривалість розрядів становить $2 \cdot 10^{-3}$ с, інтервал між ними – $7 \cdot 10^{-3}$ с, перенесений заряд $\sim 10^{-2}$ Кл, сила струму – близько 1 – 10 А. Звичайно він генерує три – чотири імпульси. Вугор народжується й набирає вагу в прісноводних водоймах. Провідність прісної води – невисока (питомий опір $\rho \approx 10 - 10^2$ Ом·м), і тому для розряду потрібні досить високі напруги. Для морської

води $\rho \approx 0,3$ Ом·м, і за сили струму $I \sim 10$ А електричний скат створює напругу всього в 50 – 60 В.

Як здійснюється навігація з локацією? У вільному просторі завдяки різниці потенціалів між головою й хвостом риби встановлюється певний (незбурений) розподіл електричного поля. Якщо в це «навігаційно-локаційне» поле потрапляє тварина або скеля, поле збурюється, риба це відчуває й поводить себе відповідним чином. Чутливість до зміни поля – дуже висока. Наприклад, у риби гімнарха вона становить величину $\Delta E_{\min} \approx 10^{-6}$ В/м. Поблизу біооб'єкта напруженість поля $E_0 \approx U_0/l \approx 100$ В/м. Тут $U_0 \approx 10$ В, $l \approx 0,1$ м – довжина риби. З огляду на те, що електростатичне поле з відстанню R убуває за законом $E(R) \approx E_0 (l/R)^2$, можна оцінити дальність дії навігаційно-локаційної системи.

Спочатку обчислимо зміну напруженості електричного поля з появою цілі з розміром $l_{\text{ц}}$ на відстані R :

$$\Delta E \approx \frac{E}{R^2} l_{\text{ц}}^2 \approx \frac{E_0 l^2 l_{\text{ц}}^2}{R^4}.$$

Вважаючи, що $\Delta E \approx \Delta E_{\min}$, одержимо

$$R_{\max} \approx \left(\frac{E_0}{\Delta E_{\min}} l^2 l_{\text{ц}}^2 \right)^{1/4}.$$

Якщо ціль – риба довжиною $l_{\text{ц}} \approx 1$ м, то $R_{\max} \approx 30$ м, якщо ціль – скеля ($l_{\text{ц}} \approx 1$ км), то $R_{\max} \approx 1\,000$ м. Ці оцінки свідчать про те, що деякі види риб мають досить досконалу навігаційно-локаційну систему.

7.3. Біоструми й біопотенціали

Живі організми реагують на зміни, що відбуваються в середовищі проживання. У найпростіших об'єктів реакція на роздратування носить механічний характер. У більш досконалих організмів – електричний характер. Генеровані електричні імпульси поширюються по нервових закінченнях – аксонах – зі швидкістю $v \sim 10 - 10^2$ м/с практично без згасання, тривалість імпульсів

$\tau \sim 10^{-3}$ с. Важливо, що питомий опір аксонів великий ($\sim 0,1$ Ом·м), і йдеться не про струм у провіднику, а про генерацію й недисипативне поширення електричних імпульсів, які мають властивості солітонів, тобто специфічних «одногорбих» відокремлених хвиль. «Родичем» солітону є, наприклад, цунамі. Нервовий імпульс має амплітуду $10^{-2} - 10^{-1}$ В.

Електричні імпульси в рослинах відрізняються за своїми параметрами; для них $v \sim 10^{-2}$ м/с, $\tau \sim 1 - 10$ с. Механізм генерації електричних імпульсів у тварин і рослин однаковий, і пов'язаний він зі здатністю мембран під впливом електричного поля змінювати свою проникність для іонів, що утворюються в результаті дисоціації молекул NaCl й KCl.

Електричні імпульси в рослинах генеруються під дією механічного подразника. Крім того, під час поранення у них виникають повільні хвилі струму. Таким чином, діяльність м'язів, нервів й інших тканин неодмінно супроводжується виникненням у живому організмі електричних струмів, названих біострумами. Джерелами струмів є клітини. У них виникають біопотенціали. В результаті підсумовування потенціалів окремих клітин виникають біопотенціали тканин і всього організму. Так, наприклад, біопотенціали мозку, серця й м'язів людини становлять величини порядку $10^{-2} - 1$; $10^{-1} - 10$ й $10^{-2} - 10^2$ мВ відповідно. Такі напруги легко виміряти. На цьому засновані методи електричної діагностики органів людини (або тварини). Загалом же біоелектричне поле – одне із найслабших у природі.

7.4. Біомагнетизм

Біомагнетизм – це напрямок у науці, що вивчає власне магнітне поле живих об'єктів. Його варто відрізнити від магнітобіології, що досліджує вплив зовнішніх магнітних полів на живу матерію (див. підрозділ 9.4). Магнітобіологія розглядає впливи полів з індукцією $B \geq 10^{-9}$ Тл.

Біомагнітні поля є найслабкіші з відомих (див. табл. 10). Їх створюють змінні біоструми – як фонові, так і стимульовані. Більшість результатів у біомагнетизмі отримано в дослідях з людиною (антропомагнетизм), значно менше – із тваринами (зоомагнетизм). Досягнення біомагнетизму дозволили вирішити проблему безконтактної діагностики органів людини, а в перспективі – і тварин.

Таблиця 10

Орієнтовні значення індукції біомагнітного поля

Джерело	B , Тл	Частота ν , Гц
Сітківка ока людини	10^{-13}	1 – 10
Фонова активність мозку людини	10^{-12}	~ 10
Викликана активність мозку людини	$(1 - 3) \cdot 10^{-12}$	~ 10
Серце кролика	$(3 - 5) \cdot 10^{-12}$	1 – 10
Око людини	10^{-11}	1 – 10
М'язи людини	$10^{-12} - 10^{-11}$	1 – 10
Подразнюваний нерв жаби	$10^{-11} - 10^{-10}$	$\sim 10^3$
Нерв людини	10^{-10}	$10^2 - 10^3$
Серце людини	$(1 - 3) \cdot 10^{-10}$	$10^{-2} - 10^2$
Сигнальні органи риб	$10^{-12} - 10^{-8}$	$\sim 10^2 - 10^3$

Крім змінних магнітних полів із частотою $\sim 1 - 10^3$ Гц, живі організми можуть створювати магнітні поля постійних (точніше майже постійних) струмів з $\nu \leq 0,1$ Гц. Виникнення таких полів пов'язане з повільними процесами (зміною температури тіла або його частин, прийманням їжі, пораненням і т. д.). Величина індукції при цьому порядку $10^{-12} - 10^{-10}$ Тл.

Давно з'ясовано, що біотканина має магнітні властивості. Ще в XIX столітті М. Фарадей визначив, що дерево, кров і м'ясо належать до діамагнетиків. Магнітні властивості печінки істотно відрізняються від властивостей перерахованих речовин, тому що печінка – основний зберігач заліза в організмі.

7.5. Світіння біооб'єктів

Холодне світло випромінюють жуки-світлячки, личинки деяких видів комарів, окремі види грибів. Це – майже повний перелік світних організмів на суші. Зовсім інакше з «живим світлом» у морі. Там виявлено більше 800 видів світних організмів. До них належать бактерії, одноклітинні організми – ночесвітки, світні рачки – еуфаузиди, мілководні кальмари – ватасенії, деякі види риб, багато видів медуз.

Світіння живих організмів має такі особливості.

По-перше, воно припадає тільки на синьо-зелену частину видимого діапазону (довжина хвилі $\lambda \approx (4 - 6) \cdot 10^{-7}$ м). Зазначимо, що якби випромінювання було теплової природи (див. підрозділ 6.5), то довжина хвилі була б значно більше, а саме $\lambda \approx 10^{-5}$ м.

По-друге, джерелом світіння слугує енергія, що виділяється під час хімічних реакцій, тому таке випромінювання відносять до хемілюмінесценції або ж до її окремого виду – біолюмінесценції. Механізм останньої такий. У результаті процесу окислювання збуджуються молекули-випромінювачі. Важливо, що реакція окислювання протікає лише в присутності ферменту люціферази, що з'являється під впливом зовнішнього подразника. Збуджені молекули, що вісвічують фотони синьо-зеленої області спектра, повертаються у вихідний (незбуджений) стан.

Орієнтовні значення потужності біолюмінесценції наведено в табл. 11. З неї видно, що чим масивніше об'єкт, то більша потужність «живого світіння».

Для порівняння додамо, що чутливість людського ока в синьо-зеленій області спектра близько $2 \cdot 10^{-17}$ Вт. У той же час верхня межа потужності світла, що його безболісно сприймає око, становить величину порядку 10^{-5} Вт.

Оцінимо параметри випромінювання об'єму морської води. Нехай швидкість випромінювання фотонів бактеріями

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = 10^4 \text{ фотон/с.}$$

Орієнтовні параметри об'єктів «живого світла»

Об'єкт	l , м	m , кг	P_1 , Вт
Бактерія	10^{-7}	10^{-18}	10^{-14}
Ночесвітка	10^{-3}	10^{-6}	10^{-6}
Жук світлячок	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Рачок еуфаузида	$(3 - 5) \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	10^{-3}
Кальмар ватасенія	10^{-1}	$10^{-1} - 1$	10^{-2}
Медуза	$(2 - 3) \cdot 10^{-1}$	$1 - 10$	10^{-1}
Риба	$10^{-1} - 1$	$1 - 10^2$	$10^{-2} - 0,1$

Енергія одного фотона з $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м дорівнює

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,7 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7}} \approx 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Тут h – стала Планка, c – швидкість світла у вакуумі. Тоді потужність випромінювання однієї бактерії

$$P_1 = E \frac{\Delta N}{\Delta t} = 4 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4 = 4 \cdot 10^{-15} \text{ Вт.}$$

Нехай концентрація бактерій $N = 10^8 \text{ м}^{-3}$, товщина шару води з ними Δh становить 10^2 м. Тоді густина потоку енергії

$$I = P_1 N \Delta h \approx 4 \cdot 10^{-15} \cdot 10^8 \cdot 10^2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2.$$

Якщо площа схвильованого океану (а саме за цієї умови бактерії світяться) $S = 1000 \times 1000 \text{ км}^2$, то загальна потужність випромінювання

$$P = IS = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{12} = 4 \cdot 10^7 \text{ Вт.}$$

Таку потужність мають двигуни великого літака.

7.6. Електромагнітне поле тіла людини

Тіло людини випромінює в чотирьох діапазонах частот: низькочастотному (частота $\nu \leq 1 \text{ кГц}$), надвисокочастотному ($\nu = 1 - 10 \text{ ГГц}$), інфрачервоному (довжина хвилі $\lambda \approx 10^{-5} \text{ м}$) й оптичному ($\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

Джерела електромагнітного випромінювання в зазначених діапазонах мають різну природу. Низькочастотні поля викликані протіканням фізіологічних процесів, пов'язаних зі зміною електричної активності органів: кишкового ($\nu \sim 10^{-2}$ Гц), серця ($\nu \approx 1$ Гц), мозку ($\nu \approx 10$ Гц) і нервових волокон ($\nu \approx 100 - 1000$ Гц).

Джерелом випромінювання в надвисокочастотному й інфрачервоному діапазонах є тепловий рух атомів і молекул тіла. Потужність випромінювання в надвисокочастотному діапазоні в смузі частот $\Delta\nu$ задаються співвідношенням:

$$P_{\text{в}} = 2\pi k T \Delta\nu \frac{S_{\text{в}}}{\lambda^2},$$

де $S_{\text{в}}$ – площа випромінювача. При $T \approx 310$ К, $\Delta\nu = 1$ ГГц, $\lambda = 0,3$ м, $S_{\text{в}} = 1$ м² маємо $P_{\text{в}} \approx 3 \cdot 10^{-10}$ Вт.

Оптичне випромінювання (холодне світло), хоча й дуже слабе, пов'язане з процесом хемілюмінесценції. Вимірювання показали, що 1 см² шкіри випромінює 6 – 60 фотон/с. При цьому $I = (2 - 20) \cdot 10^{-14}$ Вт/м². Якщо площа зіниці ока людини $S = 5 \cdot 10^{-5}$ м², маємо потужність $P = IS = 10^{-18} - 10^{-17}$ Вт. Більше значення потужності наближається до чутливості людського ока. Отже, за сприятливих умов у темряві тіло людини можна бачити. Це, однак, буває далеко не завжди. Справа в тому, що світність різних ділянок шкіри сильно відрізняється. Найбільш сильне випромінювання виходить від кінчиків пальців та обличчя людини. Майже не світяться живіт і передпліччя. Площа ділянок тіла, що світяться, становить 1 – 10 см². При цьому випромінювана потужність $P_{\text{в}} = (6 - 60) \cdot 10^{-18}$ Вт. Природно, що інтенсивність світла залежить від функціонального стану людини, від його активності. За підвищеної активності інтенсивність світіння збільшується. Ось чому середньовічні японські шпигуни (ніндзя) ховали своє тіло під чорним одягом, тим самим якнайбільше зменшуючи свою випромінювальну здатність.

8. Акустичні явища в живій природі

Яку роль відіграють звуки в рослинному світі, відомо погано, зате ми добре уявляємо їхню роль у світі тварин. Розглянемо її докладніше.

Розрізнятимемо акустичні поля тіла біооб'єкта й акустичні поля, що створюють спеціальні органи. Розпочнемо з останніх.

8.1. Загальні відомості

Звуки супроводжують тварин від дня їхнього народження. Щойно з'являючись на світ, пташеня або малюк звуками вимагають до себе уваги: їх треба нагодувати, обігріти й захистити. Тварини використовують звуки для попередження про небезпеку, щоб повідомляти про наявність їжі. Звуки приваблюють самця або самку в шлюбні періоди.

Акустичні коливання генеруються спеціальними органами тварин, наприклад, голосовими зв'язками, а також виникають у процесі переміщення біооб'єктів, наприклад, під час змахування крилами.

Діапазон частот акустичних сигналів у тваринному світі широкий: від одиниць герц до сотень кілогерц. Нагадаємо, що коливання із частотою $\nu \leq 20$ Гц називають інфразвуковими, з $\nu = 20$ Гц – 20 кГц – звуковими й з $\nu \geq 20$ кГц – ультразвуковими. Людина, як відомо, своїми органами слуху сприймає лише звукові сигнали (20 Гц – 20 кГц у молодому віці, 20 Гц – 10 кГц у літньому віці). Чутливість людського вуха $P_{\min} \approx 10^{-16}$ Вт. Багато тварин мають гостріший слух ($P_{\min} \sim 10^{-17}$ Вт). У той же час для вух людини й тварин безпечним є звук з потужністю $P_{\max} \approx 1 - 10$ Вт.

8.2. Акустичні коливання під час польоту комах і птахів

Акустичні сигнали під час польоту генеруються в результаті змахів крилами. Що більше змахів в одиницю часу, то вища час-

тота акустичних коливань. Що більше розмах крил, то рідше змах, то нижча частота генерованого звуку. Сказане ілюструє табл. 12, де наведено приклади значень характерного розміру об'єкта l , його маси m , частоти змаху крил ν і потужності акустичних коливань P . Важливо, що $\nu \sim m^{-1/4}$.

Таблиця 12

Параметри живого об'єкта й коливань крил

Об'єкт	l , м	m , кг	ν , Гц	P , Вт
Комар	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}	$(3 - 6) \cdot 10^2$	10^{-8}
Муха	10^{-2}	10^{-5}	$(2 - 3) \cdot 10^2$	10^{-7}
Бджола	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	$(2 - 4) \cdot 10^2$	10^{-6}
Джміль	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^2$	10^{-5}
Бабка	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$(0,5 - 1) \cdot 10^2$	$10^{-6} - 10^{-5}$
Жук травневий	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	$(4 - 5) \cdot 10$	10^{-5}
Колібрі	$(5 - 10) \cdot 10^{-2}$	$(2 - 20) \cdot 10^{-3}$	$(3 - 5) \cdot 10$	$10^{-5} - 10^{-4}$
Горобець	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-2}$	10	10^{-4}
Ворона	$(2 - 4) \cdot 10^{-1}$	0,3 – 1	3 – 4	$10^{-3} - 10^{-2}$
Лелека	0,5 – 1	1 – 3	2	$(1 - 3) \cdot 10^{-2}$
Альбатрос	1 – 2	5 – 10	1	$(0,5 - 1) \cdot 10^{-1}$

Таким чином, комахи генерують звукові коливання, а птахи звичайно – інфразвук.

8.3. Принцип дії природного локатора

Принципи функціонування природного й створеного людиною локаторів подібні. Розглянемо їх докладніше на прикладі акустичного локатора, що називають також сонаром. (Нагадаємо, що радіолокатор називають радаром.)

Джерело акустичних коливань (або коротко – джерело звуку) випромінює їх спрямованим пучком шириною $\Delta\alpha$ протягом часу τ , що називають тривалістю імпульсу.

Звуковий імпульс, поширюючись у просторі, досягає цілі, тобто шуканого об'єкта. Частина енергії відбивається назад до джерела, де розташований приймач звуку. Прийнятий сигнал несе в собі відомості про наявність цілі, відстань до неї, її властивості й, зокрема, розміри, швидкість цілі й інші параметри. Таким чином, будь-який локатор використовує такі властивості хвиль:

- здатність випромінюватися;
- здатність концентруватися (фокусуватися) у просторі;
- здатність прямолінійно поширюватися в однорідному середовищі;
- здатність поширюватися з постійною швидкістю в однорідному середовищі;
- здатність відбиватися від перешкод або неоднорідних включень у середовищі.

Рівняння локації.

Одержимо основне рівняння локації, що пов'язує параметри локатора й цілі. Останню опишемо за допомогою ефективної площі розсіяння (ЕПР) хвиль σ еквівалентного ізотропного випромінювача. Якщо розмір цілі більший від довжини хвилі локатора λ (тобто якщо площа цілі $S_{ц} \geq \lambda^2$), то $\sigma \approx S_{ц}$.

Нехай P – потужність джерела звуку, G – коефіцієнт підсилення потужності цього джерела за рахунок її концентрації в просторі, R – дальність до цілі. Тоді густина потоку енергії звуку біля цілі

$$I_{ц} = \frac{PG}{4\pi R^2}.$$

Об'єкт, що відбиває звук, (ціль) з ЕПР σ «перехоплює» частину потужності

$$P_{ц} = I_{ц} \sigma = \frac{PG\sigma}{4\pi R^2}$$

і випромінює її у всіх напрямках. Тоді густина потоку енергії в приймачі, що перебуває поруч із джерелом звуку, тобто на тій же відстані R від цілі,

$$I_{пр} = \frac{P_{ц}}{4\pi R^2} = \frac{PG\sigma}{(4\pi R^2)^2}.$$

Якщо S – площа прийомного пристрою (своєрідної антени), то потужність навідного сигналу

$$P_c = I_{\text{пр}} S = \frac{PG\sigma S}{(4\pi R^2)^2}. \quad (24)$$

Сигнал може бути прийнятий, якщо $P_c \geq P_{\text{п}}$, де $P_{\text{п}}$ – потужність перешкод, тобто за відношення сигнал/перешкода

$$Q = \frac{P_c}{P_{\text{п}}} \geq 1. \quad (25)$$

Тоді, як випливає з формул (24) і (25), потужність сонара повинна перевищувати величину

$$P = P_{\text{п}} \frac{(4\pi R^2)^2}{G\sigma S}.$$

Звідси максимальна дальність дії локатора дорівнює

$$R_{\text{max}} = \left(\frac{PG\sigma S}{16\pi^2 P_{\text{п}}} \right)^{1/4}. \quad (26)$$

Якщо рівень перешкод визначається хаотичним рухом молекул повітря, то

$$P_{\text{п}} = kT\Delta\nu. \quad (27)$$

де k – стала Больцмана, T – температура повітря, $\Delta\nu$ – смуга частот аналізатора акустичних коливань. Важливо, що $R_{\text{max}} \sim P^{1/4}$. Наприклад, для збільшення максимальної дальності дії локатора всього в 2 рази потужність джерела необхідно збільшити в 16 разів.

Параметри локатора.

Щоб мати можливість вимірювати дальність до цілі

$$R = \frac{v_{\text{зв}} \Delta t}{2},$$

сигнал необхідно випромінювати у вигляді коротких імпульсів тривалістю τ . Тут $v_{\text{зв}}$ – швидкість звуку, Δt – час поширення сигналу до цілі й назад. Мінімальна дальність дії локатора, а також мінімальна ще помітна відстань між двома цілями (роздільна здатність локатора) дорівнюють

$$R_{\min} = \frac{v_{\text{зв}} \tau}{2}. \quad (28)$$

Звичайно локатор випромінює імпульси з періодом $T_{\text{п}}$, який задовольняє умові

$$R_{\max} = \frac{v_{\text{зв}} T_{\text{п}}}{2}, \quad (29)$$

де R_{\max} задають рівнянням (26). Завжди $T_{\text{п}} \gg \tau$, $R_{\max} \gg R_{\min}$.

Додамо також, що коефіцієнт підсилення акустичного випромінювача

$$G \approx \frac{4\pi}{(\Delta\alpha)^2},$$

де $\Delta\alpha$ – ширина пучка в просторі (у радіанах). Величина $(\Delta\alpha)^2$ визначає тілесний кут, який вимірюють у стерadianах.

Оцінимо діапазон довжин хвиль, які використовують усонарах. Що менше λ , то менших розмірів ціль приводить до відбиття сигналу. Тому максимальна довжина хвилі $\lambda_{\max} \leq S_{\text{ц}}^{1/2}$. Однак λ не може бути занадто малою, тому що при цьому швидко зростає коефіцієнт поглинання хвилі $\kappa \sim \lambda^{-2} \sim \nu^2$, де ν – її частота. Результати оцінки довжини, на якій енергія хвилі зменшується в $e \approx 2,71$ разів, «довжини загасання» $L_{\text{заг}} = \kappa^{-1}$ акустичних коливань наведено в табл. 13.

Таблиця 13

**Довжина загасання акустичних коливань (у метрах)
залежно від їхньої частоти**

Частота, Гц	10^3	$3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	10^5
Повітря	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	50	5	0,5
Вода	10^5	10^4	10^3	10^2	10

Для локації повітряної цілі з розмірами більше декількох міліметрів оптимальна частота $\nu_{\text{оп}} \sim 10^4 - 10^5$ Гц ($\lambda = 3 - 0,3$ см), дальність дії сонара при цьому $\sim 10 - 1$ м відповідно. Для під-

водних цілей з розміром більше одного сантиметра $\nu_{\text{оп}} \sim 3 \cdot 10^4 - 10^5$ Гц ($\lambda = 5 - 1,5$ см), дальність локації становить величину $\sim 10^2 - 10$ м відповідно.

8.4. Акустичні локатори кажанів

Кажан, позбавлений зору, здатний полювати в повній темряві. Він полює на комах з характерним розміром $l \sim 3 - 6$ мм. Вижити йому допомагає природний сонар. Кажан, клацаючи, посилає акустичні сигнали тривалістю $\tau = 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ с, частотою $\nu = (4 - 8) \cdot 10^4$ Гц. Зазначимо, що значення частоти сигналів близькі до оптимальних ($10^4 - 10^5$ Гц).

Випромінювання має місце в секторі кутів $\Delta\alpha \approx 40 - 80^\circ \approx 0,7 - 1,4$ радіан. При цьому $G \approx 4\pi/(\Delta\alpha)^2 \approx 20 - 5$. Під час пошуку цілі випромінюються близько 10 імпульсів за секунду ($T_{\text{п}} \approx 0,1$ с). Коли ціль знайдено, параметри сигналу змінюються: $\tau \approx (1 - 5) \cdot 10^{-4}$ с, $T_{\text{п}} \approx 0,01$ с; при цьому для $v_{\text{зв}} \approx 330$ м/с відповідно до формул (28), (29) $R_{\text{min}} \approx 3 - 15$ см, $R_{\text{max}} \approx 3$ м. У режимі пошуку цілі $R_{\text{max}} \approx 30$ м. Оцінимо потужність акустичного випромінювача кажана, що забезпечує такі значення R_{max} , виходячи з рівняння (26):

$$P = P_{\text{п}} \frac{(4\pi R_{\text{max}}^2)^2}{G\sigma S}$$

З (27) випливає, що за $T \approx 300$ К, $\Delta\nu = 4 \cdot 10^3$ Гц потужність перешкод $P_{\text{п}} \approx 10^{-17}$ Вт. Вважаючи площу вушних перетинків $S \approx 10^{-4}$ м², ЕПР комах $\sigma \approx 10^{-5}$ м², $G = 10$, $R_{\text{max}} = 30$ м, одержимо:

$$P \approx 10^{-17} \frac{(10 \cdot 30^2)^2}{10 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-4}} \approx 0,1 \text{ Вт.}$$

Якщо густина комах досить висока, дальність дії сонару навряд чи повинна перевищувати $R_{\text{max}} \sim 10$ м, а $P \approx 10^{-3}$ Вт.

8.5. Акустичні локатори птахів

Природні сонари є в деяких птахів. До них відносять гуахаро, що живе в Америці. Він має гарний зір, але все-таки віддає перевагу полюванню вночі. Гніздяться гуахаро в темних печерах.

Параметри сонара цього птаха такі: $\nu = 1,5 - 2$ кГц ($\lambda = 0,2 - 0,15$ м), $\tau \approx 10^{-3}$ с, $T_{\text{п}} \approx 0,1$ с, $P \approx 10^{-3}$ Вт. Локатор дозволяє виявляти цілі з розмірами не менш 0,1 м (плоди пальм) на відстанях $R \sim 0,3 - 10$ м.

Крім гуахаро, природні сонари виявлено в стрижа-салангана, що живе в Південно-Східній Азії. Цей птах видає локаційні сигнали із частотою $\nu \approx 2 - 70$ кГц тільки в процесі польоту.

8.6. Акустичні локатори дельфінів

Дельфіни випромінюють акустичні сигнали в напрямку, що збігається з напрямком їхньої голови. Кутова ширина акустичного пучка $\Delta\alpha \approx 25^\circ \approx 0,5$ радіан, при цьому $G \approx 50$. Тривалість імпульсу τ становить $10^{-5} - 10^{-4}$ с, $R_{\text{min}} \approx 1,5 - 15$ см за швидкості звуку у воді $v_{\text{зв}} \approx 1500$ м/с. Для $T_{\text{п}} \sim 0,1$ с маємо $R_{\text{max}} \sim 100$ м. Частота випромінюваного сигналу становить $80 - 100$ кГц, що дуже близько до оптимальної частоти $\nu_{\text{оп}} \approx 30 - 100$ кГц (див. підрозділ 8.3). Довжина хвилі $\lambda \approx 1,5$ см; це дозволяє ефективно лоціювати рибу з розміром в декілька сантиметрів і більше.

Оцінимо потужність сонару дельфіна. Вважаючи $P_{\text{п}} = 10^{-16}$ Вт, $R_{\text{max}} = 100$ м, $G = 50$, $S \approx 10^{-3}$ м², $\sigma \approx 10^{-3}$ м², з формули (26) одержимо

$$P = P_{\text{п}} \frac{(4\pi R_{\text{max}}^2)^2}{G\sigma S} \approx 10^{-16} \frac{(10 \cdot 10^4)^2}{50 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}} \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт.}$$

Як видно із цієї оцінки, необхідна потужність акустичного сигналу відносно невелика (порівняйте з потужністю сонара кажана). Це обумовлено тим, що дельфін лоціює більші об'єкти, ніж кажан. Крім того, у нього істотно більше значення параметрів G й S . Крім локатора з акустичним (ультразвуковим) джерелом, дельфін має систему кругового огляду в діапазоні частот $1 - 10$ кГц, призначену для приймання звуку із всіх напрямків.

Сонари виявлено й в інших видів тварин, зокрема, у кашалотів. На відміну від дельфінів, кашалоти лоціюють розподілені цілі –

скупчення глибоководних кальмарів – і на значних відстанях ($R \sim 100 - 1000$ м). Тому сонар кашалота займає помітну частину тіла ссавця.

8.7. Загадкова акустична зброя китоподібних

Акустичні сигнали підводні організми можуть використовувати не тільки для локації, але й для нападу. Не виключено, що зброєю такого роду володіють китоподібні. Про це свідчать деякі досліди, проведені в США. Як відомо, кити харчуються й дрібною рибкою ($l \sim 1 - 10$ см), і величезними кальмарами. За однакових зусиль об'єкт меншої маси прискорюється сильніше, ніж об'єкт більшої маси (див. розділ 5). Для маленьких рибок $a \approx 10^2 - 10^3$ м/с², а для кита $a \approx 1 - 10$ м/с². Чи здатний кит угнатися за в'юнкою рибкою? Звичайно, ні. Існує припущення, що китоподібні можуть паралізувати або навіть убити жертву завдяки здатності генерувати потужний акустичний імпульс. Щоб убити рибу, досить потужності близько 10^7 Вт, а щоб забезпечити її нерухомість – усього $10^5 - 10^6$ Вт. У будь-якому разі, це дуже великі значення потужності. Тому залишається загадкою, чи є справді акустична зброя в китоподібних.

8.8. Акустичне поле тіла людини

Тіло людини випромінює в трьох діапазонах частот: у низькочастотному (частота $\nu \approx 0,01 - 10^2$ Гц), середньочастотному ($\nu \sim 10$ кГц) і ультразвуковому ($\nu \approx 1 - 10$ МГц). Джерела випромінювання в цих діапазонах частот мають різну природу. Низькочастотне випромінювання пов'язане з фізіологічними процесами: рухом кишкового м'язу ($\nu \sim 10^{-2}$ Гц), потоком крові в судинах, биттям серця ($\nu \approx 1$ Гц), дихальними рухами ($\nu \approx 0,1 - 1$ Гц) й іншими процесами.

Випромінювання з довжиною хвилі $\lambda \leq 0,1 - 1$ м практично не виходить назовні через майже повне відбиття акустичної енергії на межі поділу тіло – повітря. Виключення становить випромінювання з вух людини ($\nu \sim 0,5 - 5$ кГц). Його потужність становить близько 10^{-14} Вт.

Джерелом ультразвукового випромінювання є тепловий рух атомів і молекул тіла людини. Його потужність визначають температура тіла людини T і смуга частот $\Delta\nu$:

$$P = kT\Delta\nu.$$

Якщо $\Delta\nu = 1$ МГц, маємо $P \approx 4 \cdot 10^{-15}$ Вт.

Випромінювання з $\nu \geq 10$ МГц сильно загасає в тілі людини й тому не виходить назовні.

9. Вплив фізичних полів на живу матерію

Чи впливають фізичні поля на живу матерію? Якщо так, то які механізми впливу? За яких рівнів полів цей вплив істотний? Ці й інші питання обговорюємо в цьому розділі.

9.1. Загальні відомості

Біосфера – відкрита система. Вона перебуває під впливом різних фізичних полів. У процесі еволюції вона формувалася під впливом гравітаційного поля Землі, а також, значно меншою мірою, гравітаційних полів Місяця й Сонця.

Земля має порівняно сильні статичні електричне (на її поверхні напруженість $E \sim 100$ В/м) і магнітне (індукція $B \sim 10^{-4}$ Тл) поля. Ці поля не можуть не впливати на біоорганізми. Крім того, біосферу заповнюють змінні електромагнітні поля, що займають широкий частотний діапазон.

Помітну роль у життєдіяльності біоти (флори й фауни) відіграють акустичні поля.

Далі розглянемо вплив полів різної природи на живу матерію.

9.2. Гравітаційне поле

Вплив гравітаційного поля на конкретних прикладах ми вже обговорювали в розділі 4. З наведених там формул видно, що величина прискорення вільного падіння обмежує максимальні розміри дерев та тварин на суші й, меншою мірою, у воді. Вона ж визначає рухливість біооб'єктів і їхню швидкість зростання.

Роль гравітаційного поля не зводиться тільки до цього. Космічні експерименти в невагомості показали, що за відсутності гравітації одні рослини дуже сповільнюють свій розвиток, а інші навіть гинуть. Відсутність гравітації, загалом кажучи, негативно впливає на функціонування тварин і людини. Космонавти порівняно швидко (протягом декількох діб) і практично безболісно адаптуються до невагомості. Реадаптація до наявності гравітації після їхнього повернення на Землю протікає досить болісно. Поки неясно, як перенесуть космонавти невагомість протягом декількох і більше років. За відсутності гравітації з організму вимиваються життєво необхідні речовини й мінерали, змінюється низка його функцій, порушується обмін речовин (особливо водно-сольовий) і кровообіг, розладжується вестибулярний апарат.

Таким чином, роль гравітаційного поля у виникненні й існуванні біосфери важко переоцінити.

9.3. Електромагнітне поле

Змінні електромагнітні поля пов'язані з генерацією й поширенням електромагнітних хвиль, які займають діапазон частот ν від одиниць до 10^{22} Гц ($\lambda \sim 10^8 - 10^{-14}$ м).

Ефект впливу електромагнітних полів на живу матерію залежить від частоти, потужності й тривалості впливу.

До Землі доходить дуже інтенсивне ультрафіолетове випромінювання Сонця й слабке (через значне віддалення) випромінювання зірок. Ультрафіолет загалом згубно впливає на живу матерію. Це пов'язано з великою енергією фотона $E = h\nu \sim 10^{-18} - 10^{-$

¹⁶ Дж. Ще значніше впливають більш високочастотні випромінювання, до яких відносять рентгенівські промені ($\nu \sim 10^{16} - 10^{18}$ Гц) і гамма-промені ($\nu \sim 10^{18} - 10^{22}$ Гц). І перші, і другі, послаблюючись, не проникають через атмосферу Землі. Ультрафіолетове випромінювання деякою мірою затримує шар озону, розташований на висотах $z \sim 20 - 30$ км, – озоносфера. Останню, як відомо, наприкінці ХХ століття частково зруйновано.

З боку менших частот з ультрафіолетом межує оптичний діапазон. Оптичне випромінювання ($\nu \sim 10^{14}$ Гц) відіграє найважливішу роль у функціонуванні біосфери. Це завдяки йому в рослинах відбувається фотосинтез, тобто перетворення енергії світла в хімічну енергію. Це завдяки йому тварини й людина мають можливість користуватися зором. У цьому ж діапазоні хвиль спостерігаємо холодне світіння деяких біоб'єктів.

Частотам $\nu \sim 3 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{13}$ Гц відповідає інфрачервоне випромінювання. У цьому діапазоні випромінюють теплкровні об'єкти. Таке випромінювання деякі тварини використовують для теплової локації. До них відносять гримучу змію. У неї погано розвинений зір, тому вона для пошуку жертви використовує тепलोкацію. Її теплові «датчики» здатні зафіксувати зміну температури $\Delta T \approx 3 \cdot 10^{-3}$ К на відстанях до 15 см. Чутливість змії до варіацій температури приблизно в сто разів вища від чутливості шкіри людини (близько 0,3 К).

У діапазоні частот $\sim 10^3 - 10^{10}$ Гц лежать радіохвилі. В результаті їхнього впливу на живі об'єкти маємо тепловий ефект. Це відбувається за напруженості поля $E \sim 10^5$ В/м. Нетеплові ефекти електромагнітного випромінювання застосовують у мікрохвильовій й ультрависокочастотній терапії.

Більш низькочастотні ($\nu \leq 10^3$ Гц) поля будемо відносити до квазістатичних і статичних. Їх варто розглядати окремо.

9.4. Електричні й магнітні поля

Низькочастотні поля генеруються під час блискавичних розрядів, магнітосферних процесів; існують вони у вигляді стоячих хвиль у порожнині Земля – іоносфера (у шуманівському резонаторі). Статичні електричні (з напруженістю $E \sim 10^2$ В/м) і магнітні (з індукцією $B \sim 10^{-4}$ Тл) поля спостерігають на Землі постійно. Електричне поле дуже швидко убуває зі збільшенням висоти: на іоносферних висотах $E \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ В/м, а в магнітосфері воно порядку $10^{-4} - 10^{-3}$ В/м. На відміну від електричного, магнітне поле в іоносфері майже таке ж, як і біля поверхні Землі, а в магнітосфері повільно убуває зі збільшенням відстані R ($B(R) \sim B(R_3)(R_3/R)^3$).

Швидкість зміни поля.

Під час гроз, полярних сьайв, землетрусів біля поверхні Землі величина $E \sim 10^3 - 10^5$ В/м (табл. 14).

У цій же таблиці наведено значення індукції B магнітного поля й тривалості процесів Δt . З неї видно, що електричні й магнітні поля природного походження в основному є низькочастотними. Найдужчі варіації магнітного поля не перевищують 1 % від величини геомагнітного поля з $B \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Крім абсолютного значення флуктуацій ΔE й ΔB , значну роль відіграє швидкість їхньої зміни в часі $\Delta E/\Delta t$ й $\Delta B/\Delta t$, яка за порядком величини дорівнює $\nu \Delta E$ й $\nu \Delta B$ відповідно. Для полярних сьайв і землетрусів $\nu \Delta E \sim 10^2 - 10^6$ В/(м·с). Для геомагнітних пульсацій з періодом у сотні секунд маємо $\nu \Delta B \sim 10^{-9}$ Тл/с. Очевидно, наведені значення є максимальними. При цьому варто очікувати й найбільш ефективного впливу на живу матерію порівняно слабких низькочастотних електромагнітних полів.

Для порівняння в табл. 15 наведемо орієнтовні значення електромагнітних полів штучного походження, пов'язаних з роботою радіо- і телевізійних систем, з випромінюванням потужних ліній електропередач (ЛЕП) і енергоємних виробництв. Швидкості зміни в часі $\Delta E/\Delta t$ й $\Delta B/\Delta t$ поблизу випромінювачів можуть перевищувати наведені вище значення цих

**Параметри квазістатичних і статичних полів
природного походження**

Джерело	ν , Гц	E , В/м	B , Тл	Δt , с
Випромінювання блискавичних розрядів	$10 - 10^5$	10	$10^{-9} - 10^{-8}$	≤ 1
Випромінювання магнітосфери	$10^2 - 10^4$	10^{-4}	10^{-8}	∞
Шуманівський резонанс	8 - 10	10^{-3}	10^{-2}	∞
Геомагнітні пульсації	$10^{-4} - 1$	$10^{-2} - 10^2$	$10^{-11} - 10^{-7}$	$10^2 - 10^4$
Геомагнітне поле	—	—	10^{-4}	∞
Геомагнітна буря	$10^{-4} - 10^{-2}$	10^2	10^{-6}	$10^4 - 10^6$
Геоелектричне поле	—	10^2	—	∞
Гроза	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^4 - 10^5$	$10^{-9} - 10^{-8}$	$10^2 - 10^4$
Полярне сяйво	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^3 - 10^4$	$10^{-7} - 10^{-6}$	$10^2 - 10^4$
Виверження вулкана	$10^{-5} - 10^{-2}$	1 - 10^2	$10^{-11} - 10^{-10}$	$10^2 - 10^6$
Землетрус	$10^{-3} - 10^4$	$10^2 - 10^3$	$10^{-9} - 10^{-8}$	1 - 10^4
Велика пожежа	$10^{-5} - 10^{-3}$	$\sim 10 - 10^2$	$10^{-10} - 10^{-9}$	$10^3 - 10^5$
Фронт циклона	10^{-3}	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{-10}	10^5
Електромагнітне поле Землі	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-11} - 10^{-7}$	$10 - 10^4$

же величин для природних джерел. Оскільки вплив електромагнітних полів на живу матерію загалом негативний (за винятком електромагнітної терапії), установлюються їх гранично допустимі рівні в місцях знаходження людей.

Квазістатичне електричне й магнітне поля існують одночасно. Обидва поля діють на біоб'єкт. Окремо розглядати вплив тільки електричного або магнітного поля є ідеалізацією.

Механізм впливу.

У результаті численних дослідів з'ясовано, що електричні й магнітні поля здатні впливати на рослини й тварин уже за $E \sim 0,1$ В/м й $B \sim 10^{-10}$ Тл. Нагадаємо, що тепловий вплив мікрохвиль (хвиль частотою $\nu \sim 10^9 - 10^{10}$ Гц) істотний за напруженості поля $E \sim 10^5$ В/м,

**Параметри електромагнітних полів
штучного походження**

Джерело	ν , Гц	E , В/м	B , Тл	Примітка
Радіолокатори	$10^8 - 10^{10}$	$1 - 10^3$	$10^{-9} - 10^{-6}$	Випромінювання серій коротких імпульсів
Радіосистеми	$10^5 - 10^7$	$10^{-2} - 1$	$10^{-11} - 10^{-9}$	Безперервне випромінювання
Телесистеми	$10^8 - 10^9$	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-13} - 10^{-10}$	—”—
ЛЕП	50; 60	$10^{-2} - 10$	$10^{-10} - 10^{-8}$	—”—
Промислові об'єкти	$10 - 10^2$	< 1	$< 10^{-9}$	—”—

тобто в мільйони разів більшої. Який механізм впливу слабких квазістатичних полів на біооб'єкти? Його остаточно ще не встановлено. Можливо, цей механізм пов'язаний із впливом полів на іони, які є у водяних розчинах живих організмів.

Чому низькочастотні електромагнітні поля впливають на високоорганізовані біооб'єкти, зокрема, на людину? У цей час і на це питання наука не може дати однозначної відповіді. Очевидно, справа у функціонуванні серця. Виявилось, що серце – це не тільки механічний насос, але й електромагнітний генератор. Він змушує рухатися разом із кров'ю хвилі густини електричного заряду, які пов'язані з поширенням електромагнітних хвиль усередині біооб'єкта. Тоді чутливість біооб'єктів до зовнішніх електромагнітних полів можна пояснити взаємодією їх внутрішнього електромагнітного поля із цими полями.

Реакція на вплив.

Чутливість до слабких полів відіграє важливу роль у живій природі. Завдяки їй тварини можуть за десятки годин передчувати зміну погоди, за 1 – 10 годин – настання землетрусів. Вони також реагують на процеси на Сонці. Перед різкою зміною погоди різні

види організмів проявляють підвищену активність, занепокоєння, тварини стають крикливими й збудженими. Передчувають зміну погоди мурахи, риби, птахи, а також копитні, собаки, кішки й інші ссавці. Тварини звичайно прагнуть сховатися.

Найвірогідніше за все, фауна реагує на зміну погоди в результаті варіацій швидкостей хімічних реакцій.

Під час помітних сонячних збурень на Землі також спостерігають коливання рівня квазістатичного поля. Його вплив на біооб'єкти, очевидно, подібний до того, що має місце перед зміною погоди.

Перед досить сильними землетрусами (з енергією $E \geq 10^{10} - 10^{12}$ Дж) дуже багато організмів відчувають тривогу. Особливо чутливі до цього собаки, птахи, риби, змії. Реакцію тварин спостерігають на відстані 100 – 1000 км від епіцентру за 1 – 10 годин до події для середніх і сильних землетрусів відповідно. Фізичну причину такого біопередвісника землетрусів поки не встановлено. Скоріше за все, вона пов'язана зі збільшенням квазістатичного електричного поля.

Загалом можна стверджувати, що електричне й магнітне поля впливають на біооб'єкт на різних рівнях – молекулярному, клітинному, органному й організменому, а можливо, і популяційно-видовому.

Важливо, що вплив може бути не тільки енергетичним, але й інформаційним (керуючим). Саме останній проявляється в досить слабких полях.

Із впливом полів на людину, очевидно, також пов'язаний ефект біолокації (у просторіччі – лозоходство).

Літосфера – неоднорідне як по вертикалі, так і по горизонталі середовище. Ця неоднорідність викликає просторові варіації електричних параметрів поверхні Землі, а отже, і зміни електромагнітного поля. Останні можна виявити за допомогою найпростіших пристроїв на зразок дротової рамки, рогатки, лози й т. п. Так, у деяких випадках вдається знаходити поклади руди, заліза, води й інших природних багатств.

Іноді біолокацію застосовують в археології, комунальному господарстві й навіть у криміналістиці.

Різні індивідууми мають різну чутливість до локаційного ефекту.

Докладніше біолокацію і її механізм розглянуто в підрозділі 9.6.

Деякі види тварин, очевидно, використовують електричні й магнітні поля для навігації.

Добре відома здатність поштових голубів, кішок, собак знаходити дорогу додому за десятки й сотні кілометрів (так званий ефект хомінгу, англійське слово *homing* означає «повернення додому»). Перелітні птахи через тисячі кілометрів повертаються до своїх гнізд. Поки не зрозуміло, як улаштована і як працює навігаційна система тварин, які використовують геофізичні поля.

Магнітне поле специфічно впливає на рослини і їхні функції. Виявилось, що коренева система рослин орієнтується, в основному, на Південний магнітний полюс. Від орієнтації магнітного поля залежить коренева, листова й плодова маса рослин. Штучне магнітне поле здатне значно прискорити проростання, зростання рослин, підвищити врожайність.

9.5. Акустичне поле

Акустичні поля, здатні тією чи іншою мірою впливати на живу матерію, мають частоти від 10^{-3} до 10^5 Гц. Діапазони частот $10^{-3} - 10$; $10 - 10^4$ й $10^4 - 10^5$ Гц, як ми вже відзначали, відносять до інфразвуку, звуку й ультразвуку відповідно.

Акустичні поля відіграють важливу роль у світі тварин: вони попереджають про небезпеку, дозволяють «спілкуватися» між собою, сприяють пошуку їжі. Роль таких полів у світі рослин вивчено гірше, але є підстави вважати, що акустичні коливання впливають і на життєдіяльність флори. Ефективність впливу акустичних полів залежить від їхньої частоти ν , інтенсивності (зміни тиску Δp або потужності P) і тривалості впливу Δt . Деякі параметри акустичних коливань природного й штучного (антропогенного) походження наведено в табл. 16 і 17. З порівняння цих таблиць видно, що варіації

**Параметри акустичних коливань,
що їх викликають природні джерела**

Джерело випромінювання	ν , Гц	P , Вт	E , Дж	Δt , с	R , км	$\Delta p(R)$, Па
Землетрус	$10^{-2} - 1$	$10^8 - 10^{12}$	$10^8 - 10^{14}$	$1 - 10^2$	10^3	$1 - 10^2$
Цунамі	$10^{-3} - 10^{-2}$	10^9	10^{12}	10^3	10^3	$0,1 - 10$
Вулкан	$10^{-3} - 10^{-1}$	10^9	10^{12}	10^3	10^3	~ 1
Океанічний шторм	$10^{-1} - 1$	10^8	$10^{10} - 10^{13}$	$10^4 - 10^5$	10^3	$0,1 - 1$
Метеорологічний фронт	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^6	$10^{10} - 10^{11}$	$10^4 - 10^5$	10^3	$0,1$
Велика пожежа ($100 \times 100 \text{ м}^2$)	$10^{-1} - 1$	10^7	10^{11}	10^4	10^3	$0,1 - 1$
Грім	$10^{-1} - 10^3$	10^6	$10^6 - 10^8$	$1 - 10^2$	10	$0,1$
Полярне сяйво	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^6	10^9	10^3	10^2	$0,1 - 1$
Падіння великого метеорита:						
$m = 1 \text{ т}$	$10^{-1} - 1$	10^{10}	10^{10}	1	10^3	10
$m = 10^3 \text{ т}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{12}	10^{13}	10	10^3	10^2
Магнітна		$10^6 - 10^9$	$10^9 - 10^{12}$	$10^3 - 10^4$		
Суббуря	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^8	10^{12}	10^4	10^3	$0,1 - 1$

тиску Δp , що їх викликають джерела природного й штучного походження, порівнянні за величиною.

Спостереження показали, що деякі мешканці моря, ссавці, птахи й комахи активно реагують на інфразвук. За їх поведінкою можна судити про наближення метеорологічних фронтів, шторму, землетрусу, виверження вулкана, а можливо, і цунамі. Дивною є чутливість тварин до варіацій тиску, пов'язаних із надходженням

**Параметри акустичних коливань,
що їх викликають штучні джерела**

Джерело випромінювання	ν , Гц	P , Вт	E , Дж	Δt , с	R , км	$\Delta p(R)$, Па
Повітряний ядерний вибух	10^{-2}	10^{13}	10^{15}	10^2	10^3	$10^2 - 10^3$
Повітряний хімічний ввибух ($m = 250$ т)	10^{-1}	10^{11}	10^{12}	10	10^2	10^2
Стартуюча велика ракета	$1 - 10^4$	$10^7 - 10^9$	$10^9 - 10^{11}$	10^2	10	$\sim 1 - 10$
Злітаючий великий літак	$10 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	$10^5 - 10^6$	10	1	$\sim 1 - 10$
Велике місто (мегаполіс)	$10 - 10^4$	$10^6 - 10^7$	$10^{11} - 10^{12}$	10^5	$1 - 10$	~ 1
Сигнальна сирена	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	$10^5 - 10^8$	$10 - 10^3$	1	~ 1
Дамба ГЕС	$1 - 10^3$	10^5	10^{10}	10^5	1	~ 1

Примітка. Для оцінювання енергії акустичного випромінювання великого міста та дамби гідроелектростанції (ГЕС) як характерний час узято тривалість однієї доби (приблизно 10^5 с).

інфразвукових коливань. Наприклад, крихітні мушки дрозопіли реагують на дуже слабкі акустичні сигнали ($\Delta p \sim 10^{-8}$ Па, $P \sim 10^{-20} - 10^{-19}$ Вт, $\nu = 16$ Гц). Зазначимо, що чутливість кращих приладів для реєстрації інфразвуку – мікробарографів – близька до 0,1 Па.

Другий приклад пов'язаний з дивними здатностями медузи. За інфразвуковими коливаннями частотою $\nu \sim 10$ Гц, які добре поширюються у воді зі швидкістю $v \approx 1,5$ км/с, вона може виявити наближення шторму за 10 – 15 годин до його початку. І це все за розмірів приймальної «антени» біля 0,1 м. Довжина

ж хвилі складає $3 \cdot 10^7$ м. Це означає, що чутливість її «слухових» органів не гірше 10^{-2} Па.

А як реагує на інфразвук людина? Як відомо, вона безпосередньо не сприймає коливання з $\nu < 16 - 20$ Гц. Проте під впливом акустичного сигналу частотою $\nu = 7$ Гц у людини з'являється відчуття пульсацій у голові, втрачається здатність до розумової роботи. За більш тривалого опромінення виникають відчуття втоми, роздратованості, запаморочення й нудота.

Нервова система людини є досить уразливою до впливу інфразвуку; у неї з'являється відчуття дискомфорту й необґрунтованого страху. Можливо, саме інфразвук є причиною подій, коли команда корабля в повному складі залишала свій корабель у відкритому морі (не виключено, що саме так виникла легенда про «Летючий голандець»). Утім, роль низькочастотних електромагнітних коливань при цьому може бути не менш важливою.

Слабкі звукові коливання, очевидно, не зашкоджують тварині та людині. За великої потужності звук викликає хворобливі відчуття й навіть смерть. Наприклад, для людського вуха гранично припустима акустична потужність становить $\sim 1 - 10$ Вт у безпосередній близькості від барабанної перетинки за $\nu \sim 10^2 - 10^4$ Гц. Їй відповідає густина потоку енергії $\sim 10^4 - 10^5$ Вт/м².

Що стосується ультразвуку, то він за високих потужностей також є шкідливим. Виявлено, що під дією порівняно слабкого ультразвукового поля гинуть багато найпростіших організмів, пуголовки, маленькі рибки.

Слабкі ультразвукові сигнали використовують для неруйнуючої дистанційної діагностики як живих, так і неживих об'єктів. Ультразвукову діагностику застосовують для розпізнавання захворювань мозку, серця, для дослідження плода в утробі матері й т. д. Зокрема, вдається визначити стать дитини за кілька місяців до її народження.

Ультразвук знаходить застосування в хірургії, включаючи хірургію очей. В ортопедії з його допомогою безосколочно ріжуть і зрощують кістки.

9.6. Таємниця біолокаційних властивостей людини

Давно відомі біолокаційні властивості людини, що полягають нібито в її здатності знаходити підземні джерела води, поклада руд, порожнечі й т. п. за допомогою найпростішого локаційного пристрою (лози, палички, металевої рамки). Такий рід діяльності одержав назву лозоходства або лозопошуку. Нижче його названо біолокацією.

Сам факт існування й механізм біолокаційних властивостей людини до останнього часу залишався не вивченим. Висували «гіпотези» про особливий «біофізичний ефект», про «надфізичні поля», про взаємодію «біополя людини зі специфічним полем об'єкта» і т. п.

У чому ж полягає таємничість лозоходства? Чи є взагалі ефект лозопошукового характеру? Із чим він пов'язаний? Звідки береться енергія для повертання лози (рамки, рогатки, палички)? Чи має ефект практичну значущість? Спробуємо коротко відповісти на ці непрості питання. При цьому ми спиратимемося на результати досліджень, що їх виконали російські фахівці Ю. І. Юриш і Б. В. Туробов.

На сьогодні можна вважати, що ефект лозопошукового характеру все-таки існує. Про це свідчать спеціально поставлені досліди.

Головною особливістю біолокаційного ефекту є те, що локаційний пристрій (далі для стислості – рамка) повертається у всіляких ситуаціях під час пошуків об'єктів різної фізичної природи. Це означає, що рамка не може безпосередньо реагувати на фізичні поля. А на що ж або на кого ж ці поля впливають? На поля може реагувати людина-оператор. Спосіб сприйняття й індикації заснований на розвитку пригальмованого ідеомоторного акту під дією реального фізичного сигналу. Під ідеомоторним рухом, як відомо, розуміють несвідому реакцію на уявне відчуття руху. Швидше за все, механізм біолокації – спусковий. Дуже слабкий сигнал, пов'язаний зі зміною гравітаційного, електричного, маг-

нітного або електромагнітного поля, безпосередньо органи відчуттів людини не сприймають. Зате він здатний привести до гальмування ідеомоторного акту, у результаті чого рамка повертається. При цьому витрачається енергія порядку $10^{-7} - 10^{-6}$ Дж, сила – близько $10^{-5} - 10^{-4}$ Н, величина потужності, що витрачається, становить $10^{-7} - 10^{-5}$ Вт. Можна вважати доведеним, що рамка починає рухатися під дією зусиль самого оператора.

Чи завжди лозопошук має позитивні результати? Ні, далеко не завжди. Чому? Приймання корисного дуже слабого сигналу ведуть на фоні значно більш сильних перешкод. І тому багато чого залежить від кваліфікації оператора. До того ж на рівні підсвідомості під час пошуку об'єкта людина аналізує вторинні його прояви. До них належать рельєф місцевості, вологість ґрунту, склад рослинного й тваринного світу й т. п.

Через невисоку ефективність і велику кількість помилок оператора лозопошук має досить обмежену практичну цінність.

Таким чином, біолокаційний ефект, зважаючи на все, існує й заснований на несвідомій реакції людини на зміну зовнішніх умов.

10. Поняття про біоніку

Біоніка – міждисциплінарна система знань, що вивчає можливості застосування біологічних закономірностей в електроніці, техніці, кібернетиці й інших галузях людської діяльності.

10.1. Загальні відомості

З незапам'ятних часів людина намагалася наслідувати природу, хотіла літати, як птахи, плавати під водою, як риби. З розвитком механіки в XVII – XVIII століттях вона почала будувати механічні моделі живих об'єктів. Так, зокрема, з'явилися рукотворні крила, які, однак, не дозволили людині літати. Відкриття у фізиці, хімії, біології й інших розділах природознавства викликали

зростання складностей та можливостей моделей. Людина поступово переходить від сліпого копіювання живої природи до вивчення, а потім і використання знайдених у процесі еволюції розв'язків. Так з'являються повітряні кулі, дирижаблі, літаки, ракети, підводні човни й багато чого іншого. Людина поступово завойовує атмосферу й космос, морські й океанічні глибини.

Біоніка як система знань зародилася в середині ХХ століття. Фактично ж її корні сягають глибокої історії. Вона виросла із запитів практики. Термін «біоніка» з'явився в 1960 р. і є поєднанням частин двох слів «біологія» й «електроніка» (або «техніка»). Не випадково її емблемою є скальпель і паяльник, з'єднані знаком інтегралу. Девіз біоніки: «Біологічні об'єкти – ключ до нової техніки».

Появу біоніки зустріли з великим ентузіазмом. На неї поклали величезні надії. В 50 – 70 рр. ХХ століття вважали, що жива природа підкаже ще багато ефективних рішень, які будуть використані для створення нової техніки, приладів і систем. Оптимізм 50 – 60-х рр. поступово змінився деяким песимізмом 80 – 90-х рр. Виявилось, що природа не поспішає розкрити всі свої таємниці.

Очевидно, ніколи підводний човен не буде плавати так легко й витончено, як дельфін або акула. Виявляється, що тварини дуже добре вміють гасити турбулентний слід, що виникає за пливучим об'єктом. Як відомо, на генерацію турбулентності витрачається значна частина потужності рукотворних плаваючих засобів.

Питома вантажопідйомність літака (відношення його маси до потужності) становить $\sim 10^{-2}$ кг/Вт. У птахів ця величина в 5 – 10 разів більша.

Ще одним прикладом є електромагнітна сумісність радарів. Відомо, що розташовані поруч локатори заважають один одному своїм випромінюванням. У той же час кажани або птахи із сонарами живуть в одному укритті в кількості від кількох сотень до декількох тисяч особин, одночасно користуються своїми локаторами й, схоже, не створюють ніяких незручностей один одному.

10.2. Напрямки й перспективи біоніки

Зрозуміло, біоніка не ставить за мету просте наслідування живих об'єктів. Вона сприяє розкриттю принципів ефективного функціонування систем. Цілеспрямоване використання біологічних, фізичних й інших закономірностей дозволить людині створювати ще більш досконалі пристрої, машини й системи.

Біоніка може допомогти розв'язати такі задачі:

- накопичення й оброблення великих обсягів інформації;
- підвищення функціональності, гнучкості, пластичності й надійності електронних елементів, вузлів, пристроїв і систем;
- створення пристроїв і систем, що самоадаптуються;
- розроблення самопрограмувальних ЕОМ;
- створення принципово нових видів техніки;
- подальша мініатюризація електронних виробів й ін.

У природи ще є що запозичати. Покажемо це на прикладах.

Технічні системи електричного й магнітного типів дозволяють накопичувати енергію із густинами $\sim 10^4$ й 10^6 Дж/м³ відповідно. У біологічних об'єктах досягаються значення $\sim 10^7 - 10^8$ Дж/м³.

Серце людини, що являє собою хемоелектро механічний насос, протягом життя робить близько 10^9 скорочень. Кращі рукотворні насоси допускають не більше 10^7 перемикань.

Технологія інтегральної мікроелектроніки дозволяє в 1 см³ розмістити до 10^8 елементів. У той же час число нервових клітин у мозку $\sim 10^{11} - 10^{17}$ см⁻³. Перехід до нанотехнологій дозволить вирішити проблему подальшої мініатюризації виробів.

Надійність функціонування біологічних об'єктів забезпечують самовідновлення і системи багаторазового дублювання робочих елементів. Наприклад, зорові елементи в людини мають сторове резервування. Імовірність відмови такої системи $\sim 10^{-14}$. Для сучасних машин ця ймовірність $\sim 10^{-2}$.

Таким чином, можливості біоніки ще далеко не вичерпано.

11. Новітня гіпотеза зародження життя

У ХХ столітті було висунуто й обґрунтовано «теплову» гіпотезу утворення органічних сполук. Суть її полягає в такому. Приплив тепла здійснювався за рахунок сонячного ультрафіолетового випромінювання, грозових розрядів, вивержень вулканів і падінь метеоритів. Слабкість цієї гіпотези – у відсутності знань про сполуки первинної атмосфери Землі.

На початку ХХІ століття російський космофізик Г. Г. Манагадзе запропонував новий універсальний механізм синтезу органічних сполук у процесі надвисокошвидкісного удару на етапі передбіологічної еволюції. Цей механізм може реалізовуватися як на планетах, так і в міжзоряних газо-пилових хмарах.

Перші 500 млн років на Землю падало близько 1 тис. метеоритів у рік із середньою масою кожного з них близько 10^9 кг. Це відповідало густинам потоку маси й кінетичної енергії (за середньої швидкості космічного тіла 15 км/с) $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м²·рік й $2 \cdot 10^5$ Дж/м²·рік. Надвисокошвидкісний удар космічного тіла діаметром d_a приводив до утворення плазмового факела з характерним розміром близько $10d_a$. На іонізацію йшло 1 – 10 % від кінетичної енергії тіла. Температура електронів у плазмі доходила до 10^5 – 10^6 К, тиск плазми становив кілька тисяч атмосфер. Космічне тіло містило в середньому близько 3 – 7 % вуглецю, 10 % атомів вуглецю утворювали в процесі розлітання високотемпературного плазмового факела молекули, органічні сполуки. Швидкість продукції останніх становила близько $3 \cdot 10^{19}$ молекул/м²·рік.

В ударних процесах протягом одиничного акту впливу могли утворюватися складні полімери й сполуки, необхідні для створення передклітинних структур. Електромагнітні поля, генеровані в плазмовому викиді, можливо, могли викликати асиметричне зародження ізомерів, що могло надалі порушити дзеркальну симетрію біоорганічного світу.

За 500 млн років маса створених органічних сполук повинна була становити 10^{17} – 10^{18} кг. Руйнівному впливові радіації на ор-
126

ганічні сполуки перешкождали пилові хмари, що виникають у процесі кратеротворення. Вони ж сприяли перенесенню сполук на значні відстані від місця падіння космічного тіла.

Додамо, що ключові положення своєї гіпотези Г. Г. Манагадзе перевірів у лабораторних дослідах. Для створення плазмового факела він використовував потужні імпульсні лазери.

12. Короткі підсумки

1. Жива природа з'явилася з неживої, вона зберігає в собі властивості останньої. За низкою ознак жива матерія відрізняється від неживої. Обидва види матерії безупинно взаємодіють між собою. До рівнів організації живих об'єктів відносять молекулярний, клітинний, організмний, популяційно-видовий і суспільство людей.

2. Для виникнення й існування життя потрібна наявність низки астрономічних і планетарних умов. Жива матерія може існувати в найпростіших формах в екстремальних умовах (за низьких або високих температур і тисків, під час зневоднювання й за високих рівнів радіації).

Біоритми бувають внутрішні й зовнішні. Прикладом перших є серцебиття. Зовнішні біоритми (добові, місячні, річні, 11-літні й ін.) мають космічне походження.

Життя – явище космічне, а не тільки земне.

Геліобіологія й космічна біологія вивчають вплив Сонця й космічних факторів на біосферу. Основоположником відповідного навчання є О. Л. Чижевський.

Космізм – космічне бачення й розуміння світу.

Антропний принцип стверджує, що не у всякому всесвіті можуть з'явитися атоми й молекули й може зародитися життя. Наш Всесвіт дивним чином пристосований до виникнення й еволюції життя.

3. Біосфера – тонка оболонка активного життя на планеті.

Біосфера – глобальна відкрита система із численними прямими й зворотними зв'язками. Вона виконує газову, концентраційну, окислювально-відновну й біохімічну функції.

Біомаса Землі становить величину близько $2 \cdot 10^{15}$ кг, її хімічна енергія – $2 \cdot 10^{22}$ Дж, потужність – $6 \cdot 10^{13}$ Вт.

Вчення про біосферу й ноосферу розвинув В. І. Вернадський. Ноосфера – новий еволюційний стан біосфери, що його створила людина.

Математична біологія, що з'явилася в ХХ столітті, розробляє моделі основних процесів у біосфері, які можуть претендувати на загальність і універсальність, здобуваючи статус законів. До них відносять найпростіший і квадратичний закони зростання чисельності організмів, конкуренції видів, взаємодії популяцій, логістичний й інші. Закони еволюції біосфери – більш наближені й менш універсальні, ніж фізичні або хімічні закони. Це пов'язане з винятковою складністю будови біосфери й процесів у ній.

Модель типу «хижак – жертва», будучи досить універсальною, описує взаємодію багатьох популяцій. Головне в ній те, що число жертв і хижаків змінюється періодично з однаковим періодом.

4. Розмір – фундаментальна характеристика біооб'єктів. Їхній розмір варіюється від 10^{-8} до 30 м, а маса – від 10^{-20} до 10^5 кг.

Максимальний розмір дерев визначається величиною осмотичного тиску й становить величину порядку 100 м.

Мінімальна маса теплокровних тварин залежить від їхньої здатності зберігати тепло. Для птахів і ссавців вона дорівнює 1 – 2 г.

Максимальна маса обмежена здатністю скелета й м'язів витримувати навантаження. Найбільша сухопутна тварина – слон, його маса дорівнює 10 т, найбільша морська тварина – кит, його маса досягає 150 т.

5. Мікроорганізми з розміром до 10^{-6} м можуть рухатися за рахунок броунівського механізму. Швидкість, прискорення й кінетична енергія при цьому зростають зі зменшенням розміру біооб'єкта. Більші організми ($l > 10^{-5}$ м) можуть рухатися самостійно. Що більший об'єкт, то вища звичайно його швидкість. Максимальна швидкість ссавця (гепарда) досягає 30 м/с, а птаха (стрижа-колючехвоста) – 50 м/с.

Під час руху об'єкта у воді або в повітрі виникає сила опору, що пропорційна швидкості (якщо число Рейнольдса $Re < 10^3$) або її квадрату (якщо $Re > 10^3$).

Для польоту комахи й птахи використовують одну із трьох форм польоту: планерування, змах крилами у вертикальному напрямку й змах крилами в горизонтальному напрямку.

Піднімальну силу забезпечують висхідні потоки повітря, а також обтікання крила повітрям. В обох випадках тиск повітря над крилом менше, ніж під ним. Птах колібри, змахуючи крилами, створює потік повітря, спрямований униз (приблизно так, як вертоліт).

6. Енергію, що її споживає живий організм, він витрачає на виконання механічної роботи, випаровування води, теплове випромінювання (для теплокровних істот). Частина теплової енергії втрачається з відходами життєдіяльності. Енергетичні витрати тварин і людини компенсуються завдяки їжі, а рослин – під час поглинання сонячного випромінювання.

Енергетичні параметри живих об'єктів визначаються, головним чином, їхніми розмірами.

Механічна потужність людини залежно від роду діяльності змінюється від десятків ват до п'яти – шести кіловат (протягом коротких проміжків часу). Потужність його хімічної системи – близько 300 Вт.

Потужність серця людини – порядку 1 Вт.

7. Живі об'єкти здатні генерувати електромагнітні поля в широкому діапазоні частот (від статичного до інфрачервоного й навіть оптичного випромінювання).

Джерелом низькочастотних полів слугують біопотенціали й біоструми клітин, які, складаючись, визначають електромагнітне поле всього об'єкта. Рівень магнітних полів значно нижчий від рівня електричних полів.

Механізм генерації електричних полів у тварин і рослин однаковий, але швидкості поширення електричних імпульсів у перших на три – чотири порядки вищі. Це пов'язано з наявністю нервів у високоорганізованих тварин.

Деякі тварини використовують своє електричне поле для захисту, нападу, локації й навігації. Локаційно-навігаційна система підводних тварин досить досконала, вона має високу чутливість і велику дальність дії ($\sim 10^2 - 10^3$ м).

Джерелом біолоюмінесценції є збуджені молекули. Частота холодного світіння припадає на оптичний діапазон. Що масивніший біооб'єкт, то більша потужність випромінювання.

8. Звуки відіграють важливу роль у світі фауни й, очевидно, флори.

Тварини використовують акустичні коливання для спілкування, захисту, пошуку їжі, локації й навігації.

Відсутність гарно розвинутих зорових органів у деяких тварин компенсовано наявністю в них акустичних локаторів – досить досконалих природних винаходів. Сонари є в кажанів, деяких видів птахів, дельфінів і кашалотів.

Акустичні коливання також виникають під час змахування крилами, їхня частота для різних видів комах і птахів змінюється від одиниць герців до кілогерца, а потужність – від 10^{-8} до 10^{-1} Вт. Що масивніше крило, то нижча частота звуку й більша його потужність.

9. Біосфера є відкритою системою. Вона перебуває під впливом гравітаційних, акустичного, постійних електричних і магнітного, а також змінних (низькочастотних і високочастотних) електромагнітних полів.

Гравітаційне поле Землі впливає на всі функції живого організму: обмін речовин, кровообіг, рух соків у рослин, а також на розміри організмів як у рослинному, так і тваринному світі.

Ультрафіолетове й більш високочастотні електромагнітні випромінювання впливають на живу матерію.

Електромагнітні хвилі оптичного діапазону відіграють винятково важливу роль. Завдяки світлу в рослинах протікає фотосинтез, а тварини й людина можуть використовувати свої зорові системи. У цьому ж діапазоні хвиль спостерігають холодне світіння низки біооб'єктів.

Інфрачервоні промені – ефективні нагрівачі. Деякі види тварин використовують їх для теплолокації своєї жертви.

Радіовипромінювання також впливає на живу матерію, воно, зокрема, приводить до нагрівання біооб'єктів.

Останнім часом вважають, що квазістатичні електричні й магнітні поля дуже малої амплітуди (починаючи з $\sim 0,1$ В/м й 10^{-10} Тл відповідно) можуть впливати на рослинний і тваринний світ. Механізм їхнього впливу остаточно не вивчено.

Завдяки своїй високій чутливості до варіацій електричних, магнітних й інфразвукових полів деякі види тварин «завбачають» зміну погоди, збурення в біосфері після сонячних спалахів, землетруси й виверження вулканів.

Ефект біолокації в людини також, очевидно, пов'язаний із впливом на нього слабких полів.

Деякі види тварин використовують квазістатичні поля для навігації. Ефект хомінгу, можливо, пов'язаний з наявністю геомагнітного поля.

Джерелами акустичних полів є природні й антропогенні (вкликані людиною) процеси. Їхня потужність досягає $\sim 10^4$ – 10^{13} Вт, тривалість впливу змінюється в значних межах.

Вплив електромагнітних й акустичних полів на живу матерію широко використовують у медицині для діагностики захворювань, у терапії й навіть хірургії.

10. Біоніка – міждисциплінарна система знань, що вивчає застосування біологічних закономірностей у техніці. Її девіз: «Біологічні об'єкти – ключ до нової техніки».

Основні напрямки розвитку біоніки: накопичення й оброблення великих обсягів інформації; підвищення функціональності й надійності технічних виробів; створення пристроїв і систем, що самоадаптуються; розроблення принципово нових видів техніки; мініатюризація електронних виробів й ін.

11. Згідно з «новітньою гіпотезою» зародження життя, універсальний механізм синтезу органічних сполук міг бути пов'язаний із процесами, що супроводжували надвисокошвидкісний удар досить великих космічних тіл о поверхню Землі. Цей

механізм міг реалізуватися як на планетах, так й у міжзоряних газопилових хмарах.

13. Питання та вправи для самостійної роботи

1. Які ознаки живої матерії?
2. Із чого виникла жива матерія? Що цьому сприяло?
3. Як пов'язані між собою жива й нежива природа?
4. Перелічіть й охарактеризуйте рівні організації живої матерії.
5. Що Ви можете сказати про походження людини?
6. Як людина й суспільство взаємодіють із природою?
7. Опишіть основні етапи еволюції Всесвіту й живої матерії.
8. Охарактеризуйте умови виникнення й існування життя.
9. У чому суть гіпотези панспермії?
10. Які біологічні ритми ви знаєте? Опишіть їх.
11. Наведіть приклади, що підтверджують вплив Сонця на процеси в живій і неживій природі на Землі.
12. Що таке космічна біологія?
13. У чому суть космізації науки? Наведіть приклади.
14. Що таке космізм? Які ступені космізму Ви знаєте?
15. Як формулюється антропний принцип?
16. У чому суть вчення про біосферу?
17. У чому полягає вчення про ноосферу?
18. Які масштаби ноосфери? Як співвідносяться ноосфера й антропосфера?
19. Наведіть основні параметри біомаси.
20. Від чого залежить густина проживання живих організмів? Наведіть приклади.
21. Що Ви можете сказати про закони еволюції біосфери? Перелічіть основні закони (моделі) еволюції.

22. Що таке математична біологія? Порівняйте її з математичною фізикою.

23. Сформулюйте й поясніть найпростіший закон зростання чисельності організмів. Наведіть приклади його застосовності.

24. Сформулюйте й поясніть квадратичний закон зростання чисельності організмів. Наведіть приклади, що ілюструють застосування закону.

25. Наведіть приклади, що ілюструють логістичний закон.

26. У чому полягає закон конкурентного витіснення? Підтвердіть його справедливість прикладами. Чи діє цей закон у людському суспільстві?

27. Наскільки справедливі закони еволюції біосфери (закони математичної біології)? У чому причина обмеженості математичних моделей еволюції біосфери і її складових? Що треба зробити, щоб ці закони стали більш точними й універсальними?

28. Як взаємодіють популяції в біосфері? У чому суть моделі «хижак – жертва»? Як оцінити частоту й відносні амплітуди коливань числа жертв і хижаків? Від чого ці параметри залежать?

29. Поясніть причину періодичних змін числа жертв і хижаків. Яких розмірів повинен бути ареал для прояву цих змін?

30. Наведіть приклади розмірів і мас живих організмів. Які біооб'єкти – найдрібніші? Найбільші? Найлегші? Найважчі?

31. Від чого залежить розмаїтість світу рослин і світу тварин?

32. Що визначає максимальну висоту рослин? Чому вона дорівнює?

33. Наведіть приклади тварин з рекордними параметрами.

34. Від чого залежить мінімальна й максимальна маса тварин? Наведіть приклади.

35. Чи могла на Землі з'явитися людина розміром з мишу (ліліпут) або зі слона (велетень)? Відповідь обґрунтуйте.

36. Чи рухаються найдрібніші біооб'єкти? Яка їхня швидкість? Як вона залежить від розміру мікроорганізму?

37. Де більш ефективний броунівський рух: у воді чи в повітрі? Чому?

38. Як спори потрапляють у стратосферу й мезосферу?

39. Чому з досягненням певного розміру клітини починають ділитися? Врахуйте, що обмін речовин здійснюється через поверхню клітини.

40. Які перевантаження витримують живі об'єкти? Наведіть приклади.

41. Які тварини мають рекордні швидкості, прискорення й значення кінетичної енергії?

42. Що перешкоджає руху тварин у воді й повітрі?

43. Від чого залежить сила опору руху у воді й повітрі?

44. Які форми польоту використовують комахи й птахи? Наведіть приклади.

45. У чому полягає пристосованість морських тварин до життя у воді, а комах і птахів – у повітрі?

46. Опишіть перетворення енергії в живих організмах.

47. Від чого залежить величина енергії, що її споживають біооб'єкти?

48. Що визначає теплову енергію живих організмів? Порівняйте теплокровні й холоднокровні об'єкти.

49. Людина в спеку випила прохолодний напій об'ємом 0,5 л, що стояв у холодильнику за температури $t = 7^\circ\text{C}$. Чи відчує вона полегшення? Чому? Яка маса поту повинна виділитися, щоб тепловий баланс організму змінився на таку ж величину, як і під час приймання прохолодного напою?

50. Яку потужність спринтер затрачає на прискорення й гальмування ступень під час бігу? Маса кожної ступні – 1 кг. Сумарний час прискорення й гальмування – порядку 0,2 с.

51. Оцініть основні механічні параметри удару боксера (швидкість, тривалість і прискорення руху рук, силу, потужність і витрачену енергію).

52. Оцініть основні механічні параметри удару футболіста (див. попереднє завдання). Яка швидкість руху м'яча? Чи справедливо називають удари кращих бомбардирів гарматними?

53. Що розуміють під механічною енергією (потужністю) біооб'єкта? Чому дорівнює відповідний ККД?

54. Наведіть приблизні значення механічної потужності людини (що відпочиває, пішохода, землекопа, бігуна, штангіста, плавця, стрибуну). Порівняйте ці значення з потужністю коня й машин.

55. Чому дорівнює потужність серця людини? Як за такої потужності серця вона, виконуючи механічну роботу, досягає величин механічної потужності $\sim 10^2 - 10^4$ Вт?

56. Що таке теплове випромінювання живих об'єктів? Чим воно відрізняється від випромінювання абсолютно чорного тіла, Сонця й зірок?

57. Чи є різниця між випромінюваннями теплокровних і холоднокровних біооб'єктів?

58. У якому діапазоні електромагнітних хвиль живі організми випромінюють тепло?

59. Яка роль випаровування води рослинами й тваринами?

60. Наведіть і порівняйте швидкості випаровування води різними рослинами. Від чого залежить ця швидкість?

61. Порівняйте потужності й енергії, що її затрачують на випаровування води різні рослини на площі в 1 га.

62. Порівняйте потужності й енергії, що затрачують на випаровування води різні тварини й людина. Від чого вони залежать?

63. Розкажіть про добовий баланс енергій людини. Спробуйте зробити подібні оцінки для свійської тварини.

64. Як виникають електричні й магнітні поля живих об'єктів?

65. Вважаючи, що маса споживаного тваринами кисню пропорційна m^α , де $\alpha \approx 0,75$, виявіть залежність від маси тіла: а) частоти й тривалості одного циклу подиху; б) залежність частоти й тривалості одного циклу серцебиття.

66. За результатами попереднього завдання обґрунтуйте, чому тривалість життя тварин залежить від їхньої маси. Установіть цю залежність. Наскільки вона відповідає результатам спостережень?

67. Чому собака вибігає на гору, а кінь сходить на неї? Виявіть залежність швидкості вибігання на гору від маси тварини.
68. Оцініть максимальну масу птаха, який здатний літати.
69. Чим відрізняється теплове випромінювання від холодного світіння?
70. Яким цілям слугує електрика тварин?
71. Що вивчають біоелектрика й електробиологія?
72. Як електричні риби здійснюють локацію й навігацію?
73. Чи однакові параметри електричних генераторів прісноводних і морських тварин? Чому?
74. Що таке біоструми й біопотенціали? Як вони виникають?
75. Яка природа біомагнетизму?
76. Що вивчають біомагнетизм і магнітобиологія?
77. Чи має жива матерія магнетизм?
78. Поясніть природу біолюмінесценції. Наведіть і порівняйте числові характеристики.
79. Яку роль відіграють акустичні коливання у світі флори й фауни?
80. Від чого залежить частота акустичних коливань, що її генерують крила комах і птахів? Наведіть конкретні числові характеристики.
81. Поясніть принцип дії природного акустичного локатора. Як залежить його дальність дії від параметрів джерела коливань і цілі?
82. Які властивості хвиль використовує локатор?
83. Від чого залежать мінімальна й максимальна дальності дії локатора?
84. Які оптимальні частоти для акустичної локації в повітрі й у воді? Чи залежать вони від розмірів цілі? Від чого ще?
85. Наскільки близькі параметри сонарів кажанів і дельфінів до оптимальних? Чому?
86. Які тварини мають природні сонари? Порівняйте їхні параметри.
87. Під впливом яких полів перебуває біосфера?

88. Яка роль гравітаційного поля в життєдіяльності рослин і тварин?

89. Як електромагнітне випромінювання впливає на живу матерію? Від чого залежить ступінь впливу?

90. Чи впливають на живі організми радіохвилі, що їх випромінюють потужні радіостанції й телецентри?

91. Чи однакова роль «високочастотних» й «низькочастотних» електромагнітних полів?

92. Що є джерелом електромагнітних полів?

93. Яка величина чутливості біооб'єктів до квазістатичних електричних і магнітних полів? Як можна її виміряти?

94. Поясніть, як тварини можуть «завбачати» зміни погоди, землетруси й виверження вулканів.

95. Опишіть механізм впливу збурень на Сонці на організм людини й тварини.

96. Що таке біолокація? Який її механізм?

97. Що таке хомінг? Як можна його пояснити?

98. До чого зводиться вплив акустичних полів на живі об'єкти? Від чого залежить його ефективність? Наведіть приклади.

99. Назвіть джерела акустичних полів. Порівняйте їхні параметри.

100. Як використовують електромагнітні хвилі й акустичні коливання в медицині?

101. Що таке біоніка? Що вона вивчає?

102. Розкажіть, коли і які технічні рішення людина запозичила у природи.

103. Які напрямки досліджень у біоніці?

104. Опишіть історію, досягнення й перспективи біоніки.

105. Чисельність бактерій подвоюється за 20 хв. Оцініть, за який час маса бактерій буде дорівнювати масі біосфери. Чи може це відбутися? Чому?

106. Якою була б максимальна висота дерев на Місяці й на Меркурії за дотримання всіх інших земних умов?

107. Яка сила тиску діє на бактерії, що виявляють у Філіппінській западині (глибина близько 10 км)? Порівняйте цю силу з вагою бактерій. Які переваження витримують бактерії?

108. Які максимальні переваження, пов'язані з екстремальними тисками, можуть витримувати спори?

109. Яка енергія поглинається під час одержання мікроорганізмами граничної дози ультрафіолетової радіації (див. табл. 8.3)? Порівняйте цю енергію з їхньою тепловою енергією.

110. Вважаючи, що чисельність мишей і лисиць описують моделлю «хижак – жертва», оцініть період коливань їх чисельності й відносну амплітуду коливань числа хижаків, якщо відносна амплітуда коливань числа жертв дорівнює 0,5. Прийміть час відтворення мишей рівним 0,1 року, а тривалість життя лисиць – 5 рокам.

111. Оцініть, за який час спори з характерним розміром 10^{-7} м виявляться біля верхньої границі тропосфери (висота 10 км), рухаючись із броунівською швидкістю. Чи реально це?

112. Перегляньте розв'язок попередньої задачі, замінивши коефіцієнт молекулярної дифузії на коефіцієнт турбулентної дифузії ($D_t = 1 \text{ м}^2/\text{с}$). Чи реальний цей результат?

113. Приймаючи швидкість вовка рівною 15 м/с, оцініть його відносну швидкість і прискорення. Чи може заєць утекти від вовка, роблячи круті повороти? Чому?

114. Чому в лисиці й вовка хвости довгі й пухнаті, а в зайця – короткий?

115. Навіщо потрібний пухнатий хвіст білці?

116. Чи може миша на відкритій місцевості втекти від кішки, від лисиці? Прийміть швидкість тварин 1; 5 й 10 м/с. Відповідь підтвердіть оцінкою прискорень.

117. Порівняйте відносні швидкості пішохода, плавця і спринтера.

118. Якою б виявилася вага людини, слона й кита на Місяці?

119. Якою могла б бути маса місячної людини й слона?

120. Оцініть, яку механічну потужність розвиває кит, якщо він переборює опір води в $5 \cdot 10^4 \text{ Н}$.

121. Оцініть силу опору води й механічну потужність, що розвивається, під час руху найбільшої акули зі швидкістю 36 км/год. Прийміть $C = 0,1$.

122. Якою повинна бути площа крил планера масою 100 кг (разом з людиною), якщо він «зависає» над морем. Швидкість висхідних потоків повітря – 10 м/с.

123. Оцініть піднімальну силу й силу лобового опору під час руху сокола з горизонтальною швидкістю 36 км/год. Прийміть $S_A = 0,1 \text{ м}^2$, $S_B = 0,01 \text{ м}^2$. Яка маса птаха?

124. Птах масою 100 г для зависання в повітрі змахує крилами в горизонтальній площині. Оцініть швидкість потоку повітря й затрачувану механічну потужність, якщо довжина крила дорівнює 25 см.

125. Оцініть потужність й енергію, яку споживає домашній собака, якщо він за добу з'їдає 2 кг м'яса.

126. Оцініть теплову енергію домашнього собаки масою 40 кг.

127. Оцініть механічну потужність бігуна й затрачувану енергію на марафонській дистанції. Прийміть, що довжина дистанції $s = 40 \text{ км}$, тривалість бігу $\Delta t = 2 \text{ год}$.

128. Оцініть потужність, що витрачає спринтер на подолання сили опору повітря.

129. Оцініть механічну потужність лижника, який бере участь у перегонах на дистанції 10 км.

130. Оцініть механічну потужність велогонщика на дистанції 10 км.

131. Яку механічну й повну енергії затратив плавець на подолання дистанції в 10 км зі швидкістю 10 км/год?

132. Стрибун масою 60 кг переборов планку на висоті 250 см. Які середня механічна потужність спортсмена й величина затраченої енергії? Час поштовху дорівнює 0,5 с.

133. Оцініть механічну потужність людини на Місяці (див. табл. 8.7 для Землі).

134. Оцініть потужність серця за 100 ударів у хвилину. Кров масою 5 кг робить колообіг за 35 с із середньою швидкістю близько 6 м/с.

135. Оцініть потужність теплового випромінювання домашнього собаки у квартирі. Прийміть $k_e = 0,1$; $S = 1 \text{ м}^2$. Чому дорівнює енергія випромінювання за добу?

136. Температура тварини дорівнює $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Оцініть довжину хвилі теплового випромінювання, на яку припадає максимум інтенсивності.

137. Доросле хвойне дерево випаровує близько 1 літра води за добу. Оцініть потужність випаровування одного дерева та лісу площею 10^4 км^2 .

138. Один кущ картоплі випаровує 100 г води за добу. Які потужність й енергія затрачаються на випаровування, якщо площа городу 0,05 га.

139. Домашній собака за добу випаровує 100 г води. Оцініть потужність випаровування й порівняйте її із цим же параметром для людини. Чому вони так відрізняються? Що, собаці не спекотно?

140. Розрахуйте добовий баланс енергії для домашнього собаки, якщо він за цей час споживає 2 кг м'яса.

141. На скільки градусів нагрілося б тіло людини масою 70 кг під час роботи, якби потовиділення не було? Прийміть, що за годину виділяється 1 літр поту.

142. Під час важкої фізичної роботи протягом 8 годин у людини виділяється близько 12 л поту. Оцініть витрачену на це потужність і кількість відведеної теплоти.

143. Електричний опір тіла людини становить близько 10 кОм. Який струм пройде через нього, якщо він випадково торкнеться проводів, що перебувають під напругою 300 В? Чи небезпечно це для життя? (Припустима сила струму становить 10 мА). Яка потужність електричного струму, що пройшов через тіло?

144. Відомо, що ємність електропровідної кулі $C \approx r$, де C вимірюють в пФ, а радіус r – у см. Виходячи із цього, оцініть ємність тіла людини.

145. Приймаючи ємність тіла людини, що дорівнює 50 пФ, оцініть його реактивний опір на промисловій частоті (50 Гц).

146. У зимовий час у тролейбусі сталася така ситуація. Між двома жінками, одягненими в шуби із штучного хутра, проскочила іскра довжиною 2 см. Вважаючи поле пробою повітря рівним 30 кВ/см, знайдіть напругу й величину заряду. Ємність тіла прийміть рівною 50 пФ.

147. Чому блискавка, влучаючи в людину, найбільше вражає спинномозкову тканину?

148. Угор-електрофорус розміром близько 10 см створює напругу в 500 В. Оцініть силу виниклого струму й заряд, що переноситься протягом імпульсу тривалістю 2 мс. Питомий опір прісної води становить 30 Ом · м.

149. Електричний скат створює напругу 50 В. Питома провідність морської води 0,3 Ом · м. Оцініть силу струму. Порівняйте струми ската й вугра.

150. Чутливість локаційно-навігаційної системи електричної риби 2 мкВ/м. Оцініть, на якій відстані вона відчує брилу розміром 10 м. Довжина риби – 30 см, вироблювана напруга становить 300 В.

151. На якій відстані електрична риба (див. попереднє завдання) виявить свою жертву розміром 3 см?

152. Вважаючи ємність мозку, серця й м'язів людини порядку 10 пФ, оцініть запасену електричну енергію, якщо біопотенціали становлять 0,1; 1 й 10 мВ відповідно.

153. Оцініть швидкість зміни індукції біомагнітного поля людини для різних його органів (див. табл. 10).

154. Оцініть швидкість зміни індукції магнітного поля природних і штучних джерел (див. табл. 14, 15). Порівняйте ці результати з результатами попередньої задачі й зробіть висновки.

155. Тривалість нервового імпульсу в людини біля 1 мс, швидкість поширення – 30 м/с, амплітуда – 30 мВ. Оцініть довжину імпульсу в просторі й відповідну йому напруженість електричного поля.

156. Оцініть довжину електричного імпульсу й напруженість електричного поля в рослинах, якщо відомо, що тривалість ім-

пульсу – 10 с, швидкість – 1 см/с, амплітуда – 10 мВ. Порівняйте результати цієї й попередньої задач.

157. Оцініть магнітну енергію мозку людини об'ємом близько 1 дм³.

158. Оцініть, скільки фотонів в одиницю часу випромінює медуза, якщо потужність її біоломінесценції 100 мВт.

159. Знайдіть і порівняйте питому потужність (P/m) біоломінесценції об'єктів, перерахованих у табл. 11. Як можна пояснити її зміну зі збільшенням маси об'єкта?

160. Обчисліть й порівняйте питому акустичну потужність (P/m), що генерують крила комах і птахів, перерахованих у табл. 12.

161. Які параметри сонару кажана повинні змінитися, щоб дальність виявлення комах збільшилася вдвічі?

162. Вважаючи, що рівень акустичних перешкод визначається хаотичним рухом молекул повітря, оцініть чутливість вуха людини. Чи однакова чутливість у різних піддіапазонах частот?

163. Приймаючи чутливість вуха людини до потоку енергії акустичних коливань $q \approx 10^{-12}$ Вт/м², оцініть амплітуду тиску повітря Δp , швидкості частинок v і їхнього зсуву x . Урахувати, що $q = \rho v_{zv} v^2$, $\Delta p = \rho v_{zv} v$, $x = v/2\pi\nu$, де ρ – густина повітря, $v_{zv} \approx 330$ м/с – швидкість звуку, ν – його частота.

164. Дельфінові вдалося звузити вдвічі кут випромінювання $\Delta\alpha$ акустичного пучка (у горизонтальній і вертикальній площинах). Як змінилися параметри його сонара?

165. Оцініть акустичну чутливість дельфіна, вважаючи, що рівень шумів визначається хаотичним рухом молекул води.

166. Оцініть потужність сонара кашалота, якщо відомо, що $R_{\max} = 1$ км, $\sigma = 10$ м², $S = 1$ м², $G \approx 10$.

167. Оцініть чутливість сонара птаха гуахаро, вважаючи, що рівень перешкод визначається хаотичним рухом молекул повітря. Порівняйте цей результат із чутливістю слухового органа людини, дельфіна, кашалота й кажана. Зробіть висновок.

168. Чому в людини два вуха й два ока?

169. Напрямок на джерело звуку людина визначає за відносним часом запізнювання сигналу у вухах. Оцініть цей час.

170. Приймаючи чутливість ока людини, яка дорівнює 10^{-17} Вт, обчисліть мінімальне число фотонів в одиницю часу, що потрапляє при цьому в око.

171. Одне із чудес світу – піраміда Хеопса – складається з 2,3 млн кубічних блоків. Середня маса одного блоку – 3,5 т. Розміри основи піраміди – 233×233 м², висота – 147 м. Шляхом обчислень покажіть можливість її зведення з використанням найпростіших механічних пристроїв того часу й мускульної сили рабів. Оцініть, яку енергію затратили на створення піраміди, тривалість робіт і необхідну кількість рабів. Каменоломні віддалені від місця будівництва на 100 км. Чи могли давні єгиптяни створити це чудо світу? Чи допомогло природознавство відгадати історичну загадку?

172. У чому суть новітньої гіпотези зародження життя?

173. Оцініть параметри надвисокошвидкісного удару космічного тіла діаметром 1 км і швидкістю 20 км/с і супутніх процесів.

174. Поміркуйте, що хотів сказати поет М. О. Морозов такими рядками:

Не умреш ты в этом мире,
Лишь растворишься в нем ты.

175. Прокоментуйте слова К. Маркса: *«Природознавство включає у себе науку про людину такою ж мірою, якою наука про людину включає у себе природознавство: це буде одна наука»*.

176. Подумайте, який зміст вкладав О. Гумбольдт у свої слова: *«Моє головне завдання – вивчення фізики світу, будови земної кулі, відношення органічних істот до неживої природи»*.

175. О. Гумбольдт стверджував: *«Вся органічна природа об'єднана загальним зв'язком»*. Прокоментуйте це висловлення.

Література

1. Черногор Л. Ф. Фізика біосфери. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. – 102 с.
2. Черногор Л. Ф. Природознавство. Інтегруючий курс. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2008. – 524 с.
3. Геохимия и геофизика биосферы : учеб. пособие / Д. А. Антоненко, И. Ф. Высоцкая, Ю. Ю. Никифорова, Е. А. Перебора. – Краснодар : КубГАУ, 2018. – 89 с.
4. Концепции современного естествознания [Текст]: учебник / под ред. Л. А. Михайлова; УМО. - М. : Питер, 2009. - 334 с.

1804

Харківський національний
університет імені В. Н. Каразіна

2022



В. Н. Каразін
(1773 – 1842 рр.) –
«український Ломоносов». Заснував у 1804 р.
у м. Харкові університет. Відомий український
натураліст. Його наукові праці, присвячені
метеорології, атмосферній електриці, астрономії,
хімії, агрономії й іншим розділам природознавства,
значно випередили свій час.

В. Н. Каразін – «...естествоиспытатель, подавший перую мысль о возможности сделать из Метеорологии науку точную... Почётный член двух Университетов, Московского и Харьковского, член разных учёных обществ русских и иностранных».



Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна – один з найстаріших університетів Східної Європи. Заснований у 1803 р., відкритий 17 (29) січня 1805 р.

З історією Харківського університету пов'язані імена трьох лауреатів Нобелівської премії: С. Кузнеця, Л. Ландау, І. Мечникова, а також таких всесвітньо відомих учених, як історик Д. Багалей, лінгвіст А. Потебня, астроном М. Барабашов, фізико-хімік Н. Бекетов, математики О. Ляпунов, В. Марченко, А. Погорелов, В. Стеклов, радіофізики С. Брауде, Л. Литвиненко, Д. Рожанський, А. Слущкін, О. Усиков, В. Шестопапов, В. Яковенко, фізики О. Ахієзер, В. Бар'яхтар, Б. Веркін, А. Галкін, К. Синельников, І. І. Залюбовський й ін.

Сьогодні в університеті 23 факультети, де навчається понад 20 тис. студентів більш ніж за 110 спеціальностями і спеціалізаціями, працює понад 2 тис. викладачів і наукових співробітників, з яких більше 430 докторів наук, близько 1250 кандидатів наук, 30 академіків, 50 лауреатів Державних премій.

З 1974 р. є членом Міжнародної Асоціації Університетів під егідою ЮНЕСКО.

Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем – один з провідних факультетів університету. У січні 2022 р. йому виповнилося 70 років. Серед викладачів факультету 6 академіків, 1 член-кореспондент НАН України і 18 докторів наук і професорів, 20 лауреатів Державних премій.



Чорногор Леонід Феоктистович

Український радіофізик, космофізик і фізеколог, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР в області науки та техніки (1989 р.), двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, Заслужений діяч науки і техніки України, Заслужений професор ХНУ імені В. Н. Каразіна, Почесний професор Харбінського інженерного університету, Почесний професор Ціндаоського університету, академік Національної академії наук вищої освіти.

Л. Ф. Чорногор народився 2 червня 1950 р. на Харківщині, в смт. Сахновщина. В 1972 р. він із відзнакою закінчив радіофізичний факультет Харківського державного університету, в 1975 р. захистив кандидатську, а в 1987 р. – докторську дисертації.

До 1991 р. Л. Ф. Чорногор займався розробкою фізичних основ нових систем контролю космічного простору, ракетно-космічної оборони та виявлення ядерних вибухів. На цей час його наукові інтереси пов'язані з фізикою високоенергетичних явищ у системі Земля – ат-

мосфера – іоносфера –магнітосфера (в системі ЗАІМ), активними експериментами в цій системі. Ним сформульовано та розвинуто концепцію про те, що утворення ЗАІМ – відкрита нелінійна система, досліджено механізми взаємодії підсистем, визначено пороги збудження та вивчені прояви спускових механізмів у підсистемах.

Експериментально встановлено та теоретично пояснено невідоме раніше явище виникнення великомасштабних (більше 1000 км) збурень у навколоземній плазмі та геомагнітному полі, викликаних впливом на іоносферу потужного нестационарного радіовипромінювання. Запропоновано та реалізовано низку радіофізичних методів дистанційного зондування навколоземної плазми.

Опубліковано більше 1300 наукових праць, представлено на національні та міжнародні конференції більше 800 доповідей.

Л. Ф. Черногор від 1975 р. займає посаду доцента, від 1988 р. – професора, а від 2020 р. – завідувача кафедрою космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Ним поставлено більше 20 нових курсів. Опубліковано 15 підручників і 17 монографій. У них сформульовано та розвинуто концепцію про те, що навколишній світ – нелінійний, він описується нелінійними рівняннями. Показано, що нелінійне природознавство значно багатше явищами, ніж лінійна наука про природу.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Чорногор Леонід Феокистович

Фізика біосфери

Редактор

Коректор

Комп'ютерна верстка М. Б. Шевелев

Підписано до друку 12.01.2022 р. Формат 60x84 1/16.

Папір офсетний. Друк ризографічний.

Ум. дрк. арк. 6,8 вкл. Обл.-вид. арк. 6,8+2.

61022, Харків, площа Свободи, 4
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна