

НАЙВАЖЛИВІША КНИЖКА В ЧАСИ ПАНДЕМІЇ COVID-19

УСЕ ПРО ТЕ, ЯК ПРАЦЮЄ ТА ВІД ЧОГО ПОТЕРПАЄ
НАШ ВНУТРІШНІЙ ЗАХИСТ

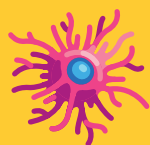
ФІЛІПП ДЕТТМЕР — засновник пізнавальної платформи *Kurzgesagt*, каналу на *YouTube*, присвяченому доступному та цікавому викладенню наукової інформації. *Kurzgesagt* залучив понад чотирнадцять мільйонів підписників і щомісяця охоплює приблизно тридцять мільйонів глядачів. Деттмер говорить про складні та важливі науково-медичні теми просто й легко, немов оповідаючи захопливу історію.

Поки ми працюємо, гуляємо парком, п'ємо каву, їдемо в метро чи щось купуємо, усередині нас відбуваються справжнісінькі баталії. Так працює надзвичайно важливий імунітет людини. Автор цієї книжки запрошує до подорожі міцною фортифікаційною спорудою нашого організму, від захисних механізмів якої дійсно залежить усе.

Що таке віруси і як вони стали такими успішними? Як долається вірусна інфекція? Чому імунна система дає збій і як її зміцнити? Які клітини продукують антитіла? Що таке аутоімунні захворювання та як виникає рак? Усередині нас стільки незвіданого, важливого, сповненого історій про перемоги, поразки та неймовірні пожертви нашого дивовижного імунітету!

Докладно та з гумором про важливу й актуальну тему. Праця Деттмера набуває особливо важливого значення під час пандемії COVID-19.

Amazon



bookclub.ua

ISBN 978-617-12-9275-8



9 786171 292758

ФІЛІПП ДЕТТМЕР

ДИВОВИЖНИЙ ІМУНІТЕТ



ФІЛІПП ДЕТТМЕР

ДИВОВИЖНИЙ ІМУНІТЕТ

ПРО АНТИТІЛА, ІНФЕКЦІЇ ТА ІНШІ ЦІКАВИНКИ
ІМУННОЇ СИСТЕМИ

КСД



PHILIPP DETTMER

IMMUNE

A JOURNEY INTO THE MYSTERIOUS SYSTEM
THAT KEEPS YOU ALIVE



Random House
New York

ФІЛІПП ДЕТТМЕР

ДИВОВИЖНИЙ ІМУНІТЕТ

ПРО АНТИТІЛА, ІНФЕКЦІЇ ТА ІНШІ ЦІКАВИНКИ
ІМУННОЇ СИСТЕМИ

ХАРКІВ
2022! КСД

УДК 612.017.1
Д38

Жодну з частин цього видання
не можна копіювати або відтворювати в будь-якій формі
без письмового дозволу видавництва

Видавництво не несе відповідальності
за можливі наслідки виконання наведених у книжці рекомендацій.
Книжка не може замінити консультації спеціаліста

Перекладено за виданням:

Dettmer Ph. Immune. A Journey Into the Mysterious System That Keeps You Alive /
Philipp Dettmer. — New York : Random House, 2021. — 344 p.

Переклад з англійської *Ольги Бершадської*

Дизайнер обкладинки *Анастасія Попова*

Популярне видання

ДЕТТМЕР Філіпп

**Дивовижний імунітет.
Про антитіла, інфекції та інші цікавинки імунної системи**

Головний редактор *С. І. Мозгова*
Відповідальний за випуск *О. М. Шелест*
Редактор *М. А. Лола*
Художній редактор *А. О. Попова*
Технічний редактор *В. Г. Євлахов*

Підписано до друку 18.11.2021. Формат 60х90/16. Друк офсетний.
Гарнітура «Wagrock Pro». Ум. друк. арк. 22.
Наклад 3000 пр. Зам. №

Книжковий Клуб «Клуб Сімейного Дозвілля»
Св. № ДК65 від 26.05.2000
61001, м. Харків, вул. Б. Хмельницького, буд. 24
E-mail: cor@bookclub.ua

Віддруковано у АТ «Харківська книжкова фабрика "Глобус»»
61011, м. Харків, вул. Різдявня, 11.
Свідоцтво ДК № 7032 від 27.12.2019 р.
www.globus-book.com

ISBN 978-617-12-9275-8
ISBN 978-0-59324-131-8 (англ.)

© Philipp Dettmer, 2021
© Depositphotos.com / rudall30, Grey-
lilac, обкладинка, 2022
© Книжковий Клуб «Клуб Сімейного
Дозвілля», видання українською мо-
вою, 2022
© Книжковий Клуб «Клуб Сімейно-
го Дозвілля», переклад і художнє
оформлення, 2022

Зміст

Передмова.....	7
Частина I. Знайомство з імунною системою	13
1. Що таке імунна система?.....	15
2. Що захищає імунна система?	22
3. Що таке клітини?	29
4. Імперії та королівства імунної системи.....	40
Частина II. Катастрофічні ураження.....	45
5. Познайомимося з нашими ворогами	47
6. Шкіра, Королівство-пустеля.....	53
7. Поранення.....	59
8. Солдати вродженої імунної системи — макрофаги й нейтрофіли	66
9. Запалення — гра з вогнем.....	73
10. Голі, сліпі й налякані. Як клітини дізнаються, куди треба рухатися?.....	78
11. Запах будівельних блоків життя	85
12. Військо невидимих убивць — система комплементу.....	90
13. Клітини-розвідники.....	100
14. Магістралі й мегаполіси	105
15. Прибуває суперзброя	112
16. Найбільша бібліотека на світі.....	117
17. Рецепти приготування рецепторів.....	120
18. Тимус — університет, де навчають убивць.....	125
19. Подача на блюдечку. Презентація антигена.....	131
20. Пробудження адаптивної імунної системи. Т-клітини.....	139

21. Фабрики зброї та снайперські гвинтівки. В-клітини й антитіла.....	146
22. Танець Т й В	158
23. Антитіла	162
Частина III. Загарбання території ворогами.....	171
24. Королівство боліт — слизова оболонка.....	173
25. Дивовижна імунна система нашого кишківника.....	180
26. Що таке вірус?.....	186
27. Імунна система легень	193
28. Грип — «нешкідливий» вірус, якого ми недостатньо поважаємо	197
29. Хімічна зброя. Втручаються інтерферони!.....	205
30. Вікно у внутрішній світ клітини.....	217
31. Фахівці з убивств — Т-кілери.....	223
32. Природні кілери.....	230
33. Як долається вірусна інфекція?.....	235
34. Згортання активності імунної системи	241
35. Імунітет. Як ваша імунна система назавжди запам'ятовує ворога?.....	245
36. Вакцини та штучна імунізація.....	253
Частина IV. Заколоти й міжусобні війни.....	263
37. Коли імунна система заслабка. ВІЛ і СНІД.....	265
38. Коли імунна система занадто агресивна. Алергія.....	272
39. Паразити. Чому імунній системі може їх бракувати?	279
40. Аутоімунні захворювання.....	284
41. Гігієнічна гіпотеза та старі друзі	293
42. Як зміцнити свою імунну систему?.....	303
43. Стрес та імунна система.....	311
44. Рак та імунна система	315
45. Пандемія коронавірусу.....	329
Післямова.....	337
Про автора	340
Примітки	341

Передмова

Уявіть, що, прокинувшись уранці, ви відчули нездужання. Надокучливий біль у горлі, нежить, легкий кашель. «Загалом мені не настільки зле, щоб не йти на роботу», — міркуєте ви, стаючи під душ, трохи роздратовані тим, що життя таке нелегке. Узагалі-то, ви не плаксива дитинка й на імунну систему не скаржитесь. Вона оберігає життя, щоб ви змогли, бідкаючись, прожити черговий день. Поки непрохані зловмисники блукають вашим організмом, убиваючи сотні тисяч клітин, імунна система організовує комплексний захист. Вона долає величезні відстані, активізує складні захисні мережі й несе швидко смерть мільйонам, якщо не мільярдам ваших ворогів. І все це відбувається тоді, коли ви, роздратовані, стоїте під душем.

Однак цей складний процес здебільшого відбувається потай від вас.

Це дуже прикро, бо небагато речей мають такий вирішальний вплив на якість життя, як імунна система. Вона всеохопна й усюдищу, захищає від безлічі неприємностей, від набридливих дрібниць, як-от застуди, подряпини й порізи, до небезпечних раку, пневмонії та загрозливих інфекцій, наприклад *COVID-19*. Імунна система настільки ж потрібна вам, як серце або легені. Насправді це одна з найбільших і всепроникних систем в організмі, хоча ми здебільшого про це не замислюємося.

Для більшості з нас імунна система — прихована за густим туманом невизначена сутність, яка дотримується дивних і непрозорих правил і, здається, часом працює, а часом ні. Вона дещо нагадує погоду, яку надзвичайно складно передбачити і яка є предметом нескінченних спекуляцій і здогадів. Результати роботи цієї системи здаються випадковими. На жаль, багато хто впевнено говорить про імунну систему, насправді не розуміючи її.

Часом буває непросто визначити, якій інформації довіряти й чому. То що ж таке імунна система та як вона насправді працює?

Ознайомлення з книжкою про механізм роботи системи, яка дає вам змогу жити, — це не просто приємна й цікава інтелектуальна вправа. Таке читання дасть вам украй потрібні знання. Дізнавшись, як працює імунна система, ви зрозумієте, як вакцини рятують вас і ваших дітей, та оціните їх корисність. Почнете ставитися до різних захворювань із більшим розумінням і набагато меншим страхом. Станете менш сприйнятливими до пропозицій продавців сумнівних «чудодейних» ліків від усіх хвороб. Знатимете більше про ліки, які насправді допоможуть під час хвороби. Розумітимете, як можна зміцнити імунну систему. Зможете захистити своїх дітей від небезпечних мікробів, не надто переймаючись тим, що вони брудняться, граючись на вулиці. У дуже серйозному випадку, скажімо в разі пандемії, знання про те, як саме вірус діє на вас і як ваш організм бореться з ним, допоможе краще зрозуміти поради експертів з охорони здоров'я.

Окрім усіх цих практичних речей, приваблює й те, що імунна система — прекрасне диво природи, не схоже на жодне інше. Вона не просто проганяє наш кашель. Вона нерозривно пов'язана майже з усіма процесами в організмі. І хоча імунна система вкрай важлива для збереження життя, існує певна ймовірність, що саме вона може призвести до передчасної смерті через свою недостатню або ж надмірну активність.

Уже майже десять років я із захопленням вивчаю неймовірно складну імунну систему людини. Це почалося ще в університеті, коли я вивчав інформаційний дизайн і шукав тему для свого семестрового проєкту. Вибрати імунну систему здавалося гарною ідеєю. Тож я зібрав величезну купу книжок з імунології та почав у них копірситися. Та хай скільки я читав, тема не ставала простішою. Що більше я дізнавався, то більш неможливим було спростити проєкт. Кожен новий аспект розкривав дедалі більше механізмів, більше винятків із них і більше складнощів. І ось робота, яку я мав виконати за весну, забрала літо, а потім і осінь та зиму. Взаємодія складових частин імунної системи була такою злагодною, а їхній

спільний танець — настільки прекрасним, що я не зміг змусити себе не дізнаватися про них більше. Це дослідження принципово змінило моє ставлення до свого організму й відчуття власного тіла.

Коли я захворів на грип, то вже не міг просто ремствувати на життя. Я почав спостерігати за своїм організмом, торкатися набряклих лімфатичних вузлів та уявляти, що саме в цей час роблять мої імунні клітини, яку частину їхньої мережі активовано та як Т-лімфоцити вбивають мільйони зловмисників, щоб мене захистити. Коли через необережність я порізався в лісі, то відчув вдячність до своїх макрофагів, великих імунних клітин, які полювали за наляканими бактеріями й розривали їх на шматки, щоб захистити мою відкриту рану від інфекції. Коли я з'їв не прийнятний для мене батончик-гранолу, переніс алергічний шок і потрапив до лікарні, то думав про мастоцити, *IgE*-антитіла та про те, як вони ледь не вбили мене, намагаючись захистити від небезпечної їжі!

Коли у віці тридцяти двох років у мене діагностували рак і я мусив перенести кілька операцій, а потім хіміотерапію, одержимість імунологією стала ще стійкішою. Одним із завдань моєї імунної системи було вбивати рак. І зробити це самотужки їй не вдалося.

Проте я не міг розлютитися чи надто засмутитися через те, бо знав, наскільки складною була ця робота для моїх імунних клітин, як тяжко їм доводилося працювати, щоб тримати хворобу під контролем. І коли хіміотерапія знищувала рак, думками я повертався до імунних клітин, які втручалися в пухлину та з'їдали її клітини одну за одною.

Нездужання та хвороби — страшна й тривожна річ, і цього я мав у житті вдосталь. Але знання про те, як саме клітини, імунна система, ця невід'ємна частина мене, захищають сутність, яка є мною, як вони борються, помирають, лікують і відновлюють тіло, у якому я перебуваю, завжди давало мені відчуття захищеності. Це знання зробило моє життя кращим і цікавішим, воно набагато послабило занепокоєння, пов'язане з хворобами. Знання про імунну систему завжди дає змогу бачити речі в перспективі.

Отож, завдяки цьому позитивному ефекту та й просто задоволенню, яке я діставав, більше дізнаючись про імунну систему,

її вивчення стало моїм постійним хобі. Урешті я зайнявся науковою комунікацією, і пояснення складних речей стало життєвою метою. Майже вісім років тому я заснував *Kurzgesagt—In a Nutshell* — канал на *YouTube*, присвячений доступному й цікавому викладенню наукової інформації. На початок 2021 року команда *Kurzgesagt* збільшилася до сорока осіб, канал залучив понад чотирнадцять мільйонів підписників і щомісяця охоплює приблизно тридцять мільйонів глядачів. Але якщо є така потужна платформа, навіщо я завдав собі чималого клопоту з написанням цієї книжки? Я мусив зробити це. Хоча деякі з наших найуспішніших відео стосувались імунної системи, я не міг висвітлити в них цю цікаву тему з тією глибиною, на яку вона заслуговує. Десятихвилинне відео не зовсім для цього вдале. Тож ця книжка — спосіб перетворити мою десятилітню любовну пригоду з імунною системою на щось відчутне. Сподіваюся, це допоможе вам у цікавий спосіб дізнатися корисні речі про чудову, неймовірно складну систему, завдяки якій ми щодня виживаємо.

Імунна система надзвичайно складна, і це ще м'яко сказано, хай як прикро це для тих, хто її вивчає. Вона настільки складна, що, якщо порівняти сходження на Еверест із її дослідженням, воно здасться приємною прогулянкою серед природи. На інтуїтивному рівні зрозуміти її не простіше, ніж переклад податкового кодексу Німеччини китайською. Імунна система — найскладніша з відомих людству біологічних систем, окрім людського мозку.

Що більше літератури з імунології ви читаете, то більше нагромаджується різних подробиць, більше винятків із правил, то складнішою, специфічною для різних можливих ситуацій видається ця система. Кожна з багатьох її частин має безліч функцій і спеціалізацій, які перекриваються та впливають одна на одну. Але навіть якщо попри все це ви візьметесь до вивчення імунної системи, то наштовхнетеся на ще одну проблему, створену людьми, які її описували.

Завдяки наполегливій праці й невичерпній цікавості науковці заклали основи дивовижного сучасного світу, у якому ми з насолодою живемо. Велика шана їм за це. Проте багатьом із них, на жаль, погано вдається добирати терміни й вигадувати доступну мову для

пояснення своїх відкриттів. Імунологічна наука завинила в цьому сенсі чи не найбільше за будь-яку іншу наукову дисципліну. І без того складна, що аж захоплює дух, галузь наповнена такими термінами, як «головний комплекс гістосумісності I і II класів», «гамма-дельта-Т-клітини», «інтерферон альфа, бета, гамма та каппа» і, на довершення, дійова особа на ім'я «комплекс *C4b2a3b*». Це аж ніяк не заохочує взяти до рук підручника й самостійно вивчати імунну систему. До того ж навіть без цього бар'єра складні взаємини численних суб'єктів імунної системи, які діють за незрозумілими на перший погляд правилами з незліченними винятками з них, — це виклик для того, хто захоче про них дізнаватися. Імунологія складна навіть для тих, хто працює в галузі медицини, та й для самих імунологів — зокрема й для передових фахівців у цій галузі.

Через усе це пояснювати особливості функціонування імунної системи вкрай незручно. Якщо ви наважитесь занадто їх спростити, то позбавите свого учня відчуття краси й дивовижності створеної генієм еволюції неймовірно складної системи, яка розв'язує найважливіші проблеми живих істот. А якщо надміру поринете в подробиці, дуже швидко стане складно стежити за вашою думкою. Перелічити все, кожную деталь імунної системи майже нереально. Це наче спробувати викласти комусь усю історію свого життя на першому побаченні. Це і неможливо, і, найімовірніше, відверне людину від подальшого знайомства з вами.

Тому під час написання цієї книжки мені довелося обережно танцювати між обома цими проблемами, намагаючись їх оминати. Я користуватимуся звичайною людською мовою й застосуватиму складні слова лише тоді, коли це знадобиться. Опис процесів та їхніх взаємодій спрощуватиму, де це можливо, однак залишаючи його максимально наближеним до наукового. Складність різних розділів книжки неоднакова. Серед них є такі, з яких ви отримуватимете чимало інформації, а є й простіші для сприйняття, щоб трохи розслабитися. Час від часу я узагальнюватиму те, про що ви дізналися. Хочу, щоб ця книжка допомогла кожному зрозуміти власну імунну систему й на додачу трохи розважитися.

Оскільки всі ці складність і краса тісно пов'язані з вашим здоров'ям і виживанням, ви навчитеся чогось справді корисного. І коли наступного разу захворієте, то, сподіваюся, зможете поглянути на власний організм інакше.

Додам обов'язкове застереження: я не імунолог, а науковий комунікатор та ентузіаст вивчення імунної системи. Джерела й коментарі з рекомендаціями щодо глибшого ознайомлення з темою можна знайти наприкінці книжки. Вона не зможе задовольнити кожного імунолога — очевидно, що є багато різних ідей і концепцій щодо подробиць роботи імунної системи. Є й багато розбіжностей між думками науковців, які дотримуються різних ідей. (Саме так працює наука!) Наприклад, деякі імунологи вважають певні клітини рудиментами, а інші впевнені, що вони мають вирішальне значення для нашого захисту. Тож ця книжка, наскільки це можливо, базується на бесідах із науковцями, на сучасній літературі, яку використовують для викладання імунології, та на наукових публікаціях.

Звісно, колись у майбутньому ця книжка потребуватиме оновлення.

І це насправді чудово! Імунологічна наука — динамічна сфера, де відбувається багато дивовижних речей, і різні теорії та ідеї змінюють одна одну. Ця наука жива, і в ній досі стаються великі відкриття. Це добре, бо ми дізнаємося більше про себе та світ, у якому живемо.

Отож, перш ніж ви розпочнете вивчати, як працює наша імунна система, визначимо передумови, на які треба спиратися: що таке імунна система, у якому контексті вона працює та які саме клітини виконують таку важливу роботу. Опанувавши ці основи, ми дослідимо, що відбувається після поранення та як імунна система кидається нас захищати. Далі дізнаємося про найуразливіші частини організму й побачимо, як він намагається захиститися від тяжких інфекцій. І нарешті, розглянемо різні імунні розлади, як-от алергія та аутоімунні захворювання, та обговоримо, як можна поліпшити власну імунну систему. А тепер дозвольте мені почати розповідь.

ЧАСТИНА I

**ЗНАЙОМСТВО
З ІМУННОЮ СИСТЕМОЮ**

1. Що таке імунна система?

Історія імунної системи розпочалася майже три з половиною мільярди років тому водночас із зародженням самого життя в якійсь дивній калюжі на не надто сприятливій за життєвими умовами планеті. Невідомо, чим займалися ці перші живі істоти та як їм велося, але ми знаємо, що дуже скоро вони вороже налаштувались одна до одної. Якщо життя здається вам тяжким, бо треба рано вставати, щоб підготувати дітей до нового дня, або ваш гамбургер не дуже смачний, то перші живі клітини на Землі багато чого розповіли б вам про справжні життєві труднощі. Коли їм довелося вигадувати, як із речовин навколо себе добути потрібну для існування енергію, деякі з них пішли найкоротшим шляхом. Навіщо завдавати собі клопоту й самотужки виконувати нелегку роботу, якщо можна просто вкрасти все потрібне в когось іншого? Робили це кількома способами. Наприклад, ковтали когось цілком або робили в ньому дірки й висмоктували нутроці. Однак це було небезпечно, і замість того, щоб дістати дармові харчі, нападник міг стати їжею потенційної жертви, особливо більшої та сильнішої. Можна було отримати бажане й із меншим ризиком для себе — потрапити комусь у череву й уже там розслабитися. Харчуватися тим, що їсть він, і почуватися захищено в його теплих обіймах. Начебто добре, якби це не завдавало жахливих страждань господареві.

Оскільки важливою стратегією виживання стало отримання всього потрібного для існування від інших, то на еволюційну потребу перетворилася здатність захищатися від подібних кровопивць. Так мікроорганізми змагалися поміж собою протягом наступних 2,9 мільярда років, удосконалюючи обидва типи

зброї — для нападу та для захисту. Якби ми мали машину часу, щоб помилуватися їх боротьбою, то картина не видалася б надто цікавою. Ми не помітили б нічого, крім тонких плівок бактерій подекуди на вологому камінні. Перші кілька мільярдів років Земля була доволі нудним місцем. Поки життя не зробило найбільший і найскладніший за всю свою історію стрибок.

Невідомо, як саме розпочався перехід від одиночних, переважно самостійних клітин до величезних спеціалізованих клітинних колективів, які тісно співпрацювали¹. Майже 541 мільйон років тому життя багатоклітинних тварин раптом почало бурхливо розвиватись і стало помітним. Ба більше, дуже швидко воно стало надзвичайно різноманітним. Однак у наших новоявлених предків виникли великі проблеми. Мільярди років мікроби, які жили у своєму мікроскопічному світі, змагалися за простір і ресурси в усіх доступних їм екосистемах. А що ж таке тварини для бактерій та інших дрібних істот, якщо не надзвичайно сприятлива екосистема? Екосистема, ущерть заповнена дармовими поживними речовинами. Тож від самого початку всілякі непрохані гості й паразити становили реальну небезпеку для існування багатоклітинного життя.

Вижили й дістали шанс стати ще складнішими лише ті багатоклітинні істоти, які знайшли способи боротьби з цією загрозою. Клітини та тканини погано зберігаються протягом сотень мільйонів років, тому, на жаль, ми не можемо розглянути скам'янілі рештки первісної імунної системи. Але завдяки магії науки можна вивчати розмаїте дерево життя тварин, які існують сьогодні, і їхню імунну систему. Що далі одна від одної на цьому дереві перебувають дві істоти зі спільною ознакою імунної системи, то старшою має бути ця ознака.

Тож виникає цікаве запитання: чим відрізняються та в чому однакові імунні системи різних тварин? Майже всі нинішні живі істоти мають певну форму внутрішнього захисту. Якщо вони складнішають, то складнішає і їхня імунна система. Можна дізнатися багато нового про вік імунної системи, порівнюючи захисні засоби дуже віддалених родичів.

Навіть найдрібніші бактерії мають способи захисту від вірусів, і тим не вдається захопити їх без боротьби. Губки, найдавніші з усіх багатоклітинних тварин, які існують уже понад пів мільярда років, володіють чимось на кшталт первісної примітивної імунної відповіді, характерної для тварин. Це так званий *гуморальний імунітет*. «Гумор» у цьому контексті — це давньогрецький термін, яким позначають тілесні рідини. Гуморальний імунітет формують дрібні білкові утворення, які плавають у позаклітинних тілесних рідинах тварин. Ці білки пошкоджують і вбивають мікроорганізми, яких там не має бути. Цей тип захисту виявився настільки успішним і корисним, що є практично в усіх сучасних тваринних організмів, зокрема й у нас. Еволюція не відмовилася від нього, а, навпаки, зробила вирішальним для будь-якого імунного захисту. Загалом він не змінився за пів мільярда років.

Але це був лише початок. Багатоклітинні тварини дістали змогу мати багато різних спеціалізованих клітин. Тож таким тваринам не знадобилося забагато часу в еволюційному зрізі, щоб набути клітин, які спеціалізувалися саме на захисті організму. Цей новий вид захисту, *клітинний імунітет*, мав успіх від самого початку. Навіть у червів і комах ми знаходимо спеціалізовані імунні клітини-бійці, які вільно пересуваються маленьким тілом тваринки й завше готові стати до бою з непроханими прибульцями. Що вище ми піднімаємося еволюційним деревом, то досконалішою стає імунна система. Але вже на найнижчій гілці хребетних видно певні основоположні новації. Це окремі імунні органи й центри утворення імунних клітин, які з'явилися разом з одним із найефективніших принципів імунітету — здатністю розпізнавати конкретних ворогів, швидко виробляти багато спеціальної зброї проти них і зберігати пам'ять про цих ворогів на майбутнє!

Такий механізм є навіть у найпримітивніших хребетних — кумедних на вигляд безщелепних риб. Протягом сотень мільйонів років ця захисна система ставала дедалі витонченішою та досконалішою. Але її основні принципи, які доволі добре пра-

цюють і досі, існували в певних формах уже приблизно пів мільярда років тому. Отже, наразі ми користуємося потужною розвиненою системою захисту, однак її основні механізми надзвичайно поширені серед тварин, і історія їх походження сягає сотень мільйонів років. Еволюції не доводилося винаходити імунну систему знову та знову — вона просто вдосконалювала її.

І це, урешті рещт, привело до створення імунної системи людини. Тобто нашої з вами. Ми користуємось імунною системою, удосконалення якої тривало сотні мільйонів років. Наша імунна система сягнула вершини розвитку. Однак насправді це не щось окреме всередині нас. *Вона і є нами*. Імунна система — це прояв нашої біології, який захищає нас і робить можливим наше життя. Отже, говорячи про свою імунну систему, ми говоримо про себе.

Імунна система — не щось окреме. Це складна взаємопов'язана мережа сотень баз і вербувальних центрів по всьому організму. Їх з'єднують магістралі й мережі, які пронизують весь організм так само, як і судини. Окрім того, у нас у грудях є ще й спеціальний імунний орган завбільшки з крильце курчати, ефективність якого зменшується з віком.

На додачу до спеціальних органів з їхньою інфраструктурою, десятки мільярдів імунних клітин, готових захоплювати ворогів у разі потреби, патрулюють у магістралях нашого кровотоку. Ще мільярди клітин охороняють від загарбників тканини нашого організму, які межують із навколишнім середовищем. Крім цієї активної оборони, є й інша захисна система, яка складається з квінтільйонів одиниць білкової зброї, схожої на самозбірні міни, які вільно плавають. Наша імунна система також має спеціальні «університети», де клітини навчаються того, з ким і як боротися. У цих «університетах» діє щось на кшталт найбільшої біологічної бібліотеки у світі, яка дає змогу ідентифікувати й запам'ятовувати кожного можливого загарбника, з яким ми коли-небудь стикалися.

За своєю суттю імунна система — це інструмент, який дає змогу відрізнити іншого від самого себе. Не має значення, шкодить нам цей інший чи ні. Якщо іншого немає в ексклюзивному списку гостей, яким дозволено заходити, його треба атакувати та знищи-

ти, оскільки він потенційно може завдати нам шкоди. З погляду імунної системи будь-що «інше» не вартє ризику. Без цієї умови ми померли б за кілька днів. І, на жаль, якщо наша імунна система недостатньо або надміру старанна, наслідком цього може бути хвороба або навіть смерть, про що я розповім далі в цій книжці.

Тим часом визначення свого й чужого — *це суть*, а не *мета* нашої імунної системи. Головна її мета — налагодження та підтримування гомеостазу, тобто рівноваги між усіма елементами та клітинами в організмі. Імунна система докладає неймовірних старань, намагаючись діяти врівноважено та спокійно, без надмірної реакції. Оберігати мир в організмі, так би мовити. Стабільний порядок, який робить життя приємним і легким. Це і є те, що ми називаємо здоров'ям. А здоров'я — основа комфортного й вільного життя, коли ми, не обмежені болем і хворобами, можемо робити те, що хочемо.

Наскільки важливе здоров'я, розумієш, коли його втрачаєш. Насправді здоров'я — абстрактне поняття, оскільки описує відсутність страждань і болю, обмежень. Якщо ми здорові, то відчуваємося нормально, добре. Коли ж помічаємо, що здоров'я зникає, хоч би й ненадовго, одразу із сумом згадуємо, які ми вразливі й недовговічні. Хвороби — це атрибут нашого життя. Якщо пощастило, то ви, можливо, досі не стикалися з ними. Якщо ж вам або комусь із ваших близьких уже доводилося пережити тяжкі хвороби, то ви усвідомлюєте, що для нормального життя немає нічого важливішого за здоров'я. Для імунної системи здоров'я означає стан гомеостазу. Результат битви за його збереження в підсумку, на жаль, визначений наперед, і ми в будь-якому разі колись остаточно її програємо, однак намагаємося вибороти для себе якомога більше років, місяців, днів і годин. Бо загалом дуже добре бути людиною, і хочеться, щоб цей досвід був якомога довшим.

Та підтримувати здоров'я непросто, оскільки щодня протягом життя ми контактуємо із сотнями мільйонів бактерій і вірусів, які хочуть зробити наше тіло своєю домівкою, як це було з одноклітинними організмами мільярди років тому. Для мікроорганізмів ми — екосистема, яка чекає, що вони її завоюють.

Це безмежний континент, багатий на ресурси, місця для розмноження та можливості для процвітання їхнього потомства, чудова домівка. Вочевидь, певної миті вони таки завоюють цей континент. Бо коли людина помирає, саме армія розгнudzаних мікробів, яких більше не контролює захисна система організму, надзвичайно швидко розкладає тіло.

Нам доводиться перейматися не лише через численні спроби живих істот проникнути до нас усередину, але й через можливі помилки власного організму, які можуть призвести до порушення взаємодії між його системами, а відтак до раку. Стежити за тим, щоб цього не сталося, — одне з найважливіших завдань нашої імунної системи. Насправді, поки ви читали останні кілька сторінок, десь усередині вас імунні клітини тихцем знищували молоду ракову клітину.

Проте навіть із тим, що призначено для вашого захисту, щось може піти не так. Якщо ввести імунну систему в оману, вона може допомагати хворобам поширюватися або захищати ракові клітини від виявлення та знищення. Не налаштований як треба або пошкоджений імунітет може заплутатися і вирішити, що саме наш організм — його ворог. Він може сплутати своє з чужорідним і почати атакувати клітини, які має захищати. Унаслідок цього виникають аутоімунні захворювання, які потребують постійного медикаментозного лікування, іноді з побічними ефектами.

Або візьмемо алергію, яка є надмірно інтенсивною реакцією нашої імунної системи на те, що насправді не мало б її турбувати. Алергічний шок наочно демонструє, наскільки потужний людський імунітет і яке жахіття може статися, якщо з ним щось не так. Хвороба може вбити нас за кілька днів, а власна імунна система — за лічені хвилини.

Навіть якщо імунна система працює за призначенням, вона може завдавати чимало клопоту. Багато неприємних симптомів, які ми відчуваємо під час хвороби, — це наслідок активної роботи імунітету. За деяких захворювань до найбільшої шкоди або навіть смерті призводить його невідповідна реакція на вторг-

нення. Наприклад, чимало смертей від *COVID-19* спричинені саме імунною системою, яка працює з надмірним ентузіазмом.

Ураження, яких завдає нам власна захисна система, можуть накопичуватися з часом. Є думка, що багато смертельних захворювань починаються саме з реакції імунної системи. Отже, наскільки важливо для нашого здоров'я мати швидку й жорстку імунну систему, настільки ж важливо контролювати її та запобігати ураженням, яких вона може завдати. Як і у звичайному житті, якщо вже доводиться йти на війну, ми хочемо, принаймні, щоб вона швидко закінчилася та ще й нашою цілковитою перемогою. Ми прагнемо уникнути тривалої окупації чи безперервних конфліктів, які з'їдають ресурси й залишають по собі зруйновану інфраструктуру.

Отже, на імунній системі лежить величезна відповідальність за те, щоб ми були здоровими якомога довше. Навіть попри те, що, урешті-решт, ми, безумовно, програємо битву, цієї миті для нас важливо перемогти.

Підбиваючи підсумок, можна сказати, що розмежування між своїм і чужим — це суть імунної системи, а підтримування гомеостазу — її мета. Однак, як виявляється, існує безліч приводів для того, щоб усе знезацька пішло не так.

Найцікавіше в складній роботі імунної системи те, що її виконують бездумні структури, нездатні мислити. І все ж вони здатні координувати свої дії та реагувати на динамічну ситуацію, яка швидко розвивається. Уявіть, що відбувається Друга світова війна або навіть щось удесятеро масштабніше, але без генералів на чолі війська. Лише позбавлені здорового глузду солдати Армії імунітету самотужки намагаються з'ясувати, чи потрібні їм танки або винищувачі й куди саме їх треба спрямувати. І все це відбувається кілька днів. Приблизно так само ми беремося зі звичайнісінькою застудою.

Тож розгляньмо докладніше особливості імунної системи, щоб наступного разу, ставши під душ і відчуваючи роздратування через раптові симптоми застуди, замість нарікань хоча б на хвилючку замислитися й оцінити, що саме відбувається в нашому організмі.

2. Що захищає імунна система?

Перш ніж почнемо з'ясовувати, як улаштовано складну систему імунного захисту, спробуймо дізнатися трохи більше про те, що вона має захищати, — про наше тіло. На перший погляд усе просто. Тіло — це шкіра й усе те, що міститься під нею. Що ж тут складного? Але ви ніколи бодай приблизно не зрозумієте, що відбувається на планеті, спостерігаючи за нею з космосу. Так і тут. Отже, перш ніж рухатися далі, пориньмо в незнайомий, незвіданий для нас, як океанські глибини або чужі планети, світ. Світ, де жодна істота навіть не усвідомлює, що існує, де різноманітні чудовиська — повсякденність, але ніхто через них не переймається. Світ, якому мільярди років, який існує всередині нас, але залишається для нас невідомим. Мікроскопічний світ, де губиться межа між мертвим і живим. Де біохімічні реакції з досі незрозумілих нам причин створюють життя. Тож наблизьмося до нього й зазирнімо до органів, тканин і найелементарніших часточок нашої будови — до клітин.

Клітина — це мініатюрна жива сутність, найменша одиниця життя на Землі. Для окремої клітини наше тіло — планета, яка рухається крізь ворожий Усесвіт. Щоб усвідомити величезність нашого тіла, варто поглянути на нього з точки зору клітини. У її масштабі це велетенська споруда, пронизана широченними трубами з океанами рідини, швидкі потоки якої омивають вигадливі печерні утворення в безмежному просторі. Усе наше внутрішнє середовище, окрім кристалізованої твердої частини кісток, увесь цей світ для клітини живий. Вона може ввічливо попросити будь-яку стіну пропустити її та просочитися крізь крихтіну щілінку, яка закритється одразу за нею. Вона може плавати каналами й підніматися на м'язові гори, діставатися куди завгодно.

Якби ми були завбільшки з власну клітину, людське тіло височіло б над нами, як п'ятнадцять чи двадцять Еверестів, поставлених один на один. Це була б гора плоті заввишки сто кілометрів, яка сягала б космосу. Якщо ви сидите поблизу вікна, відволічіться на мить від читання й погляньте на небо. Спробуйте уявити гіганта, настільки величезного, що пасажирські літаки врізаються йому в гомілки, а його голова так далеко над вами, що її навіть не видно.

Клітинам імунної системи доручено *все це* захищати. Особливо вразливі ті місця, куди можуть безпосередньо потрапити зловмисники, а це переважно межі, *зовнішні кордони* тіла. Говорячи про ці зовнішні кордони, насамперед ми маємо на увазі, звісно, шкіру. Її загальна площа становить приблизно два квадратні метри (це приблизно вдвічі менше за більярдний стіл), і, на щастя, шкіру не так уже й складно захистити, бо здебільшого вона складається зі щільного міцного бар'єра з власною системою захисту. Цей бар'єр видається м'яким, але його доволі складно подолати, якщо він цілий.

Дійсно вразливе для зараження місце — це слизові оболонки, які вистеляють дихальні шляхи й легені, повіки, рот і ніс, шлунок і кишечник, статеві органи й сечовий міхур. Складно назвати їхню загальну площу, оскільки вона може дуже відрізнятися, але в середньому у здорової дорослої людини є приблизно двісті квадратних метрів слизової оболонки (майже стільки ж, скільки займає тенісний корт). Переважно це слизова оболонка легень і травного тракту.

Може здатися, що слизові оболонки — внутрішні. Насправді ж це не так — вони зовнішні. Наше тіло, у певному сенсі, — ніщо інше, яка складно влаштована трубка. Волога, вкрита слизом трубка з отворами з обох кінців.

Статеві органи, ніздрі й вуха — це додаткові отвори, входи до великих тунелів і системи печер, які пронизують наше тіло. Отже, слизові оболонки — кордон, межа, яка контактує із зовнішнім світом. Наше тіло немов огортає їх. Хоча ця межа начебто пролягає всередині нас, крізь неї щодня намагаються

продертися мільйони зловмисників. Якщо зважати на розміри клітин, то територія, яку їм доводиться захищати, неймовірно велика. Для наших клітин площа слизових оболонок така ж, як для нас територія Європи чи Сполучених Штатів Америки. Будівництво стіни на кордоні тут не допомогло б, бо обороняти треба не просто кордони, а *всю територію!* Зловмисники, наче парашутний десант, можуть пробитися через будь-яку її точку. Тож наші клітини мусять захищати весь цей континент. По всій його території.

І все ж набагато простіше затримати ворога саме тут, ніж деінде. Якби ми взяли, наприклад, усі кровоносні судини й капіляри нашого організму й виклали їх у вигляді прямої лінії, вони, на наш подив, розтяглися б на 120 000 кілометрів у довжину — це втричі більше за довжину екватора Землі. Площа ж їхньої поверхні становить майже 1200 квадратних метрів. Отже, простіше затримувати ворогів на значно меншій зовнішній поверхні. Але простіше все ж не означає легко.

Здійсніть подумки цікавий експеримент. Уявіть, що ви захотіли збудувати людське тіло, але в збільшеному масштабі, узявши замість клітин людей. Ви побачите, з якими шаленими числами в такому разі довелось б зіткнутися.

Отже, насамперед для цього знадобилася б безліч людей. У середньому людське тіло складається приблизно із 40 трильйонів клітин. Трильйонів! Сорок трильйонів — це 40 000 000 000 000. Неймовірне число. Якби ми захотіли, щоб клітини тіла цього гіганта було представлено окремими людьми, то їх знадобилося б у сотню разів більше, ніж існувало за всі 250 000 років історії людства. Спробуймо уявити це наочно. Нині живе приблизно 7,8 мільярда людей. Якби ми поставили їх плечем до плеча, вони, хай як дивно, зайняли б площу лише приблизно 1800 квадратних кілометрів. Це трохи більше, ніж територія Лондона. Щоб отримати 40 трильйонів людей, треба помножити на 120 їх наявну кількість².

Отже, маємо 40 трильйонів людей, які стоять пліч-о-пліч. Це людське море зайняло б усю Велику Британію, кожен куточок

Наше тіло — трубка



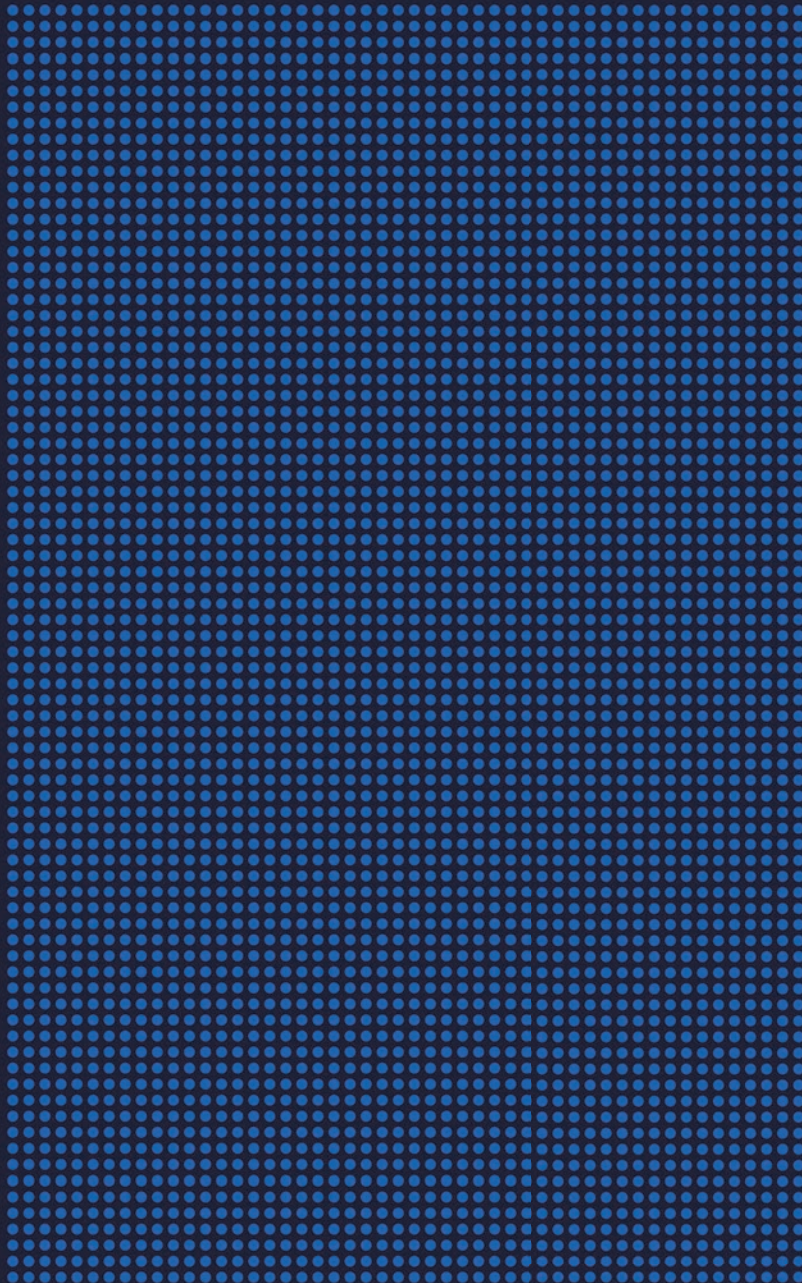
її рівнин, озер і гір. Щоб скласти тіло в масштабі, у якому кожна клітину представляє людина, треба було б, щоб трильйони людей стали одне на одного і, тримаючись за руки, утворили життєві структури. Цей велетень здійнявся б у небо на 100 кілометрів, сягнувши космосу. Він складався б з органів завбільшки з невеличкі країни, пронизаних заплутаними печерами й тунелями, і величезних, наче гори, кісток. Його артерії були б наповнені океанами рідини, а люди-клітини розносили б їжу та ємності з киснем у кожен найвіддаленіший куточок тіла. Якби ви були «людиною-червонокривцем», ви щохвилини долали б таку відстань, як від Парижа до Рима й назад, із потоком рідини, яку перекачувало б величезне, як самі ці міста, серце. Усе могло б бути чудово. Усі злагоджено працювали б, щоб зберегти життя цій горі плоті й собі заодно.

Але величезні харчові ресурси й чималі обшири вологого теплового простору всередині велетня завбільшки з континент — дуже привабливі не лише для його мешканців, а й для небажаних відвідувачів. Без перебільшення мільярди паразитів намагаються проникнути всередину цього гіганта з плоті. Деякі з них величезні, як слони або сині кити. Вони мають намір відкласти тут свої гігантські яйця, щоб їхній молодняк міг поласувати бідолашними людьми-клітинами, із яких складаються тканини. Інші за розміром як єноти або щури, вони хочуть красти для себе їжу та зробити велетня постійною домівкою для вирощування своїх нащадків. Можливо, вони й не хотіли б завдавати безпосередньої шкоди людям-клітинам, із яких складається тіло, але їхні випорожнення шкідливі, і в такий спосіб вони ускладнюють життя клітин. Найогидніші шкідники, із якими доводиться щодня стикатися нашому гігантові з плоті, — це мільярди павуків, які намагаються потрапити до рота чи вух людей-клітин, щоб розмножуватися всередині них. Для гіганта, який складається з трильйонів людей-клітин, утратити їх там і сям потроху насправді не надто небезпечно. Але якби шкідникам дозволили вільно розмножуватися, гігантові міг би настати кінець. Хіба ж це не жахливо?

Усе нинішнє людство $\approx 7,8$ мільярда



Клітин у нашому тілі ≈ 40 трильйонів



 = 10 мільярдів

Це саме те, з чим наші клітини мають справу щодня та щоночі, від нашого народження до самої смерті. Те, що ми живемо, не можна сприймати як належне. Але й надто перейматися думками про ці напади на нас не варто. Адже ми не просто гора плоті, яка чекає, коли її підкорять. На щастя, у нас є потужний союзник у цій боротьбі за виживання, якого ми, однак, не цінуємо й не поважаємо так, як він заслуговує. Це — наша імунна система.

Саме вона робить наше тіло фортецею. Навіть більше — фортецею з мільярдами найсильніших і найвідважніших солдатів на світі. Вони мають безліч зброї, яку застосовують без жодного милосердя. Армія імунної системи вже вбила мільярди ворогів і паразитів протягом нашого життя й готова вбити їх далі мільярдами чи навіть трильйонами.

3. Що таке клітини?

Ми вже чимало говорили про клітини й будемо говорити про них у наступних частинах цієї книжки. Щоб дізнатися більше про людський організм, його імунну систему та хвороби, з якими він бореться, від раку до грипу, треба зрозуміти, як улаштовано його базові елементи. З'ясувати, що таке клітини. У цьому нам допоможе те, що вчення про клітини — чи не найцікавіша галузь біології. Прочитавши цей розділ, ви зможете інакше поглянути на імунну систему та краще її зрозуміти.

То що ж таке клітина та як вона працює?

Як ми вже з'ясували, клітина — це найменша одиниця життя, об'єкт, який можна чітко визначити як щось живе. Хоча ми розуміємо, що таке життя, дати йому визначення дуже складно. Загалом, живих об'єктів відрізняють від решти всесвіту кілька властивостей. Живим об'єктам властивий метаболізм, тобто вони поглинають поживні речовини ззовні й виводять назовні відходи. Вони реагують на подразники. Ростуть і можуть збільшуватися. Усе це ознаки клітин. Ми ж майже повністю складаємося з них. Наші м'язи, внутрішні органи, шкіра й волосся складаються з клітин. Ними наповнена кров. Клітини не мають свідомості, свободи волі, почуттів чи мети, вони не приймають активних рішень. Можна назвати клітини біологічними роботами. Їх функціонування цілковито зумовлене безліччю біохімічних реакцій, а реакціями керують певні складові частини клітин.

Наші клітини мають «органи», так звані органели, наприклад ядро, яке є інформаційним центром клітини. Це доволі велика структура із власним захисним бар'єром, у якій міститься ДНК,

наш генетичний код. У клітині також є мітохондрії — генератори, які перетворюють їжу й кисень на хімічну енергію для підтримування роботи клітин. Є спеціалізована транспортна мережа, пакувальний центр, пристосування для перетравлення та переробляння продуктів, будівельні центри. Під час вивчення будови клітин їх часто зображують як такі собі пакети, наповнені цими органелами. Але така картина не дає достатнього уявлення про складні процеси, які вирують у клітині.

Озирніться кімнатою, де перебуваєте³. Уявіть, що всю її вщерть заповнюють різноманітні об'єкти — мільйони піщинок, мільйони рисових зернин, кілька тисяч яблук і персиків, ще й десяток великих кавунів. Приблизно так виглядає клітина всередині. Що це означає?

Кожна людська клітина заповнена десятками мільйонів різних молекул. Половина з них — молекули води. У нашій метафорі вони представлені піщинками, які надають внутрішньому вмісту клітини консистенції на кшталт м'якого желе. Це дає змогу іншим молекулам легко пересуватися, бо в такому масштабі вода вже не рідка, а в'язка, як мед⁴.

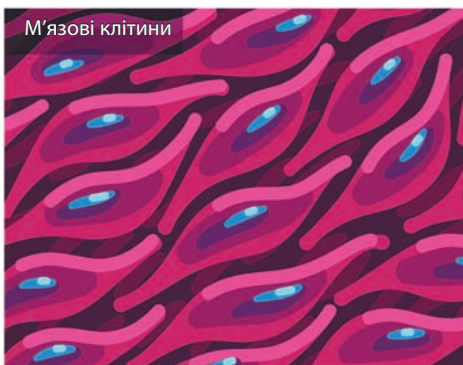
Інша половина вмісту клітин складається здебільшого з мільйонів молекул різних білків. Їх може бути від 1000 до 10 000 різних видів — залежно від функції та призначення. У нашому прикладі з кімнатою це будуть рис і більшість фруктів. Кавуни — це органели, які ми завжди бачимо на фотографіях клітин. Отже, наші клітини здебільшого складаються з білків і ними ж заповнені.

Тепер треба трохи поговорити про *білки*, тому що знання про них надзвичайно важливе для розуміння функціонування імунної системи, клітин і мікросвіту, у якому вони перебувають. Білки настільки важливі для клітин, що клітини можна було б назвати білковими роботами. Імовірно, вам доводилося чути про білки здебільшого в контексті харчування. Можливо, ви навіть перебуваєте на білковій дієті, особливо якщо багато тренуєтесь і намагаєтесь наростити м'язи. Це має сенс, оскільки найщільніші частини нашого тіла складаються

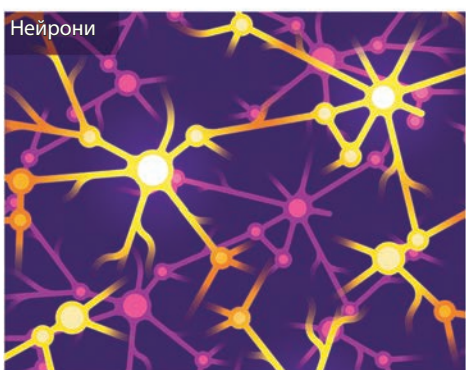
Червоні кров'яні клітини



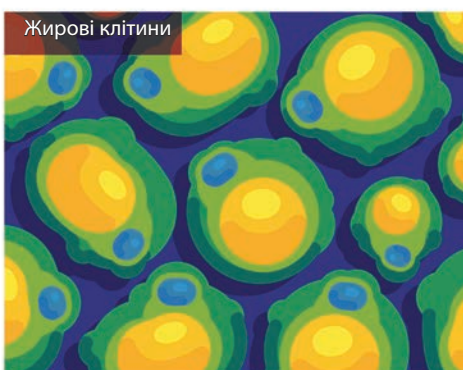
М'язові клітини



Нейрони



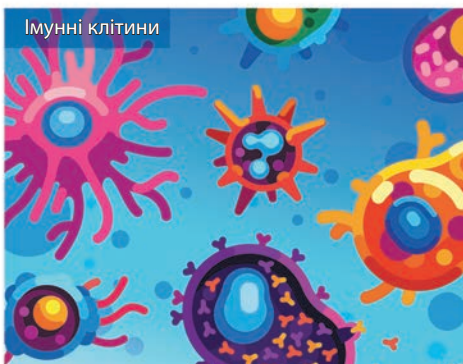
Жирові клітини



Епітеліальні клітини



Імунні клітини



переважно з білка (навіть кістки — це суміш білків і солей кальцію). Але білки потрібні не лише для нарощування м'язів. Це найважливіша органічна речовина, з якої складається та завдяки якій функціонує все живе на нашій планеті. Вони настільки потрібні й різноманітні, що клітини можуть використовувати їх для чого завгодно — від побудови простих стінок до надсилання сигналів і конструювання мікромеханізмів.

Білки складаються з ланцюжків амінокислот, які слугують своєрідними блоками під час побудови білкових молекул. Відомо про 20 видів амінокислот. Треба лише зв'язати їх у ланцюжок у потрібній послідовності. І вуаля! Білок готовий. Цей принцип дає змогу живим істотам утворювати приголомшливу кількість різноманітних білків. Наприклад, якщо ви хочете створити простий білок із ланцюжком із 10 амінокислот, яких є 20 видів, то кількість можливих білків вражає — 10 240 000 000 000.

Уявіть, що у вас є гральний автомат із 20 різними символами й 10 слотами. Доволі складно двічі отримати одну комбінацію символів на гральній машині з трьома слотами. Подумайте лише, скільки комбінацій може видати наш білковий «гральний автомат». До складу типового білка зазвичай входять від 50 до 2000 молекул амінокислот (що можна вважати еквівалентом грального автомата, який має від 50 до 2000 слотів), а найдовші з відомих білків складаються з 30 000 молекул амінокислот. Це дає мільярди мільярдів потенційно корисних білків, які можуть виробляти наші клітини.

Звісно, більшість із цих можливих білків були б ні для чого непридатними. За деякими підрахунками, лише одна з мільйона або, може, мільярда можливих комбінацій амінокислот дає корисний білок. Та оскільки можливих білків аж так багацько, то достатньо навіть одного з мільярда! Звідки наші клітини знають, у якій послідовності треба поєднувати амінокислоти, щоб виробляти потрібні білки?

За це відповідає наш код життя — ДНК. Це ніби послідовна інструкція, яка робить можливим утворення живої істоти. Приблизно 1 % ДНК складається з послідовностей, які є шаблонами

для побудови білків, тобто *генами*. Решта ДНК регулює, які саме білки будувати, коли, як і скільки. Отже, білки настільки важливі для живих істот, що код життя — це насамперед інструкція щодо їх побудови. Але як усе це працює? З'ясуємо, бо це буде важливо для нас згодом, коли говоритимемо про віруси. Інструкції, закодовані в ДНК, перетворюються на білки шляхом двоступеневого процесу. Спеціальні білки зчитують інформацію з молекули ДНК і записують на спеціальні молекули-месенджери, які називаються мРНК і використовуються для передавання інформації, закованої в ДНК.

Потім молекула мРНК транспортується з ядра клітини до іншої органели — рибосоми, яка відповідає за виробництво білка. Тут зчитується інформація з молекули мРНК, і, згідно з нею, амінокислоти в певній послідовності з'єднуються в молекулу білка. І вуаля! Клітина створила білок відповідно до інформації, закованої в ДНК. Отже, наша ДНК — це здебільшого купа закованої інформації, окремі розділи якої називають генами. ДНК — інструкція щодо побудови білка й керування роботою клітинних механізмів. Так вона зумовлює всі наші ознаки: зріст, колір очей, сприйнятливість до певних захворювань чи кучеряве волосся. ДНК не наказує нашому тілу: «Зроби волосся кучерявим!» Вона наказує клітинам: «Виробляйте ось такі білки». Якщо спростити, усі наші особисті риси виявляються саме так.

Наш генетичний код зберігає чимало інформації. Якби ми розгорнули в довжину всю ДНК лише *однієї* з наших клітин, вона простяглася б приблизно на два метри. Це дійсно так: спільна довжина молекул ДНК, які містяться в кожній із наших клітин, перевищує людський зріст. Якби ми взяли всю ДНК з усіх клітин нашого тіла й об'єднали її в довгу нитку, вона простяглася б від Землі до Плутона й назад. І всю цю інформацію призначено для створення довгих ланцюжків амінокислот!⁵

Під час створення цих амінокислотних ланцюжків вони трансформуються з довгих двовимірних у тривимірні структури. Тобто здатні складатись у різний спосіб завдяки механізмам,

які й досі не повністю розшифровано. Ланцюжок складається в структуру певної форми залежно від типу амінокислот у ньому й послідовності їх з'єднання.

Форма білків визначає, що саме вони можуть і чого не можуть робити. Форма білка для нього — усе. Білки можна уявити як шматочки складного тривимірного пазла. Залежно від своєї форми білки можуть бути або найточнішим інструментом, або будівельним матеріалом.

Клітини будують усе переважно з білків. Але білки — це не лише будівельний матеріал. Вони слугують месенджерами для передавання інформації — можуть приймати або надсилати сигнали, які змінюють форму цих білків і викликають надзвичайно складні ланцюгові реакції. Для наших клітин білки — це все. Згадайте кімнату, наповнену рисом, персиками та яблуками. Насправді всі ці білки схожі не на сфери. Разом вони нагадують радше незбагненно складне поєднання механізмів, коліщат, кісточок доміно, перемикачів і різноманітних деталей.

Поки клітина жива, у ній завжди все рухається й переміщується. Коліщата обертаються й перекидають кісточку доміно, які натискають на вимикачі, тягнуть за собою важелі та спрямовують по коліях кульки, які потім знову обертають ще більше коліщат, і так далі. Якщо вдатися до метафізичного визначення, то душею клітини-робота є білки й біохімічні реакції, якими вони керують.

Деяких із найпоширеніших білків у наших клітинах надзвичайно багато — майже пів мільйона окремих копій. Інших, більш спеціалізованих, може бути лише приблизно десять копій. Але вони не просто плавають, виконуючи кожен свою функцію. Усі ці крихітні шматочки білкового пазла в наших клітинах складно взаємодіють між собою. Як саме? Завдяки тому, що рухаються достатньо швидко. Молекули білка настільки малі, так мало важать і існують в настільки принципово відмінному від нашого масштабі, що поводяться дуже незвично, якщо порівняти з предметами в нашому вимірі. Гравітація не діє з відповідною силою на об'єкти такого розміру. Отже, за кімнатної температури

Білки

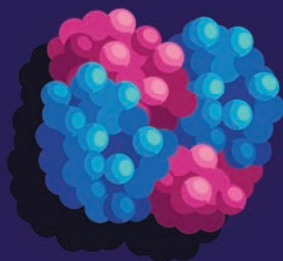
Білки — найпоширеніший будівельний матеріал для клітин. Вони також передають сигнали й інформацію. Клітини будують усе переважно з білків.



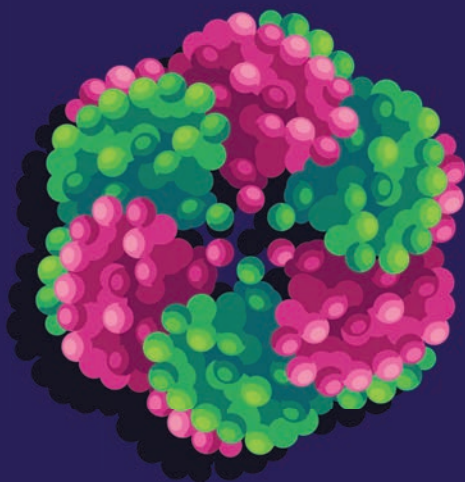
Пепсин



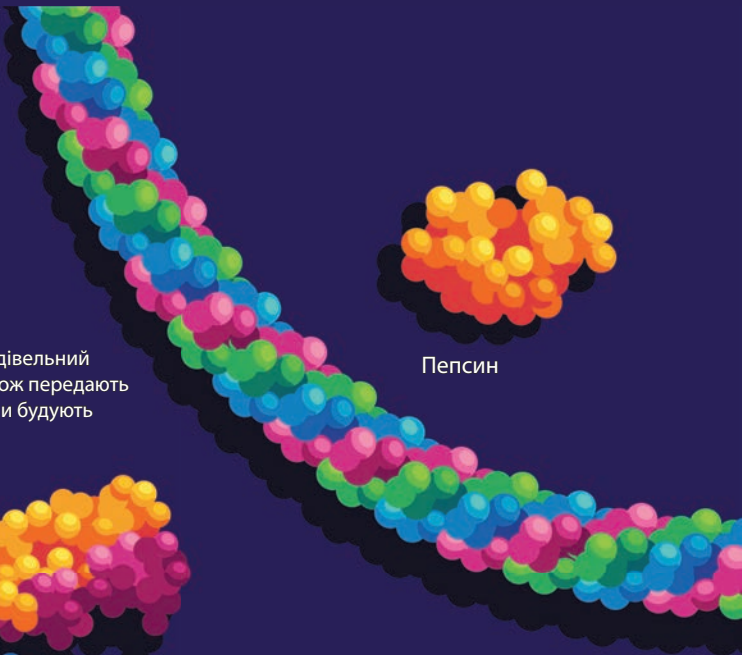
Антитіло



Гемоглобін



Глутамінсинтетаза



Актин



10 нанометрів