

В. АВРАМЕНКО, А. ЗАГОРОДНІЙ, Є. МАРТИНОВ

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГРІД-ТЕХНОЛОГІЇ В МЕДИЦИНІ

Світові інформаційні ресурси відкривають перед Україною широкі можливості щодо розвитку новітніх технологій, зокрема, в медицині. Сьогодні інтенсивно збільшується національний сегмент комп'ютерної мережі та мережі Інтернет, який залучають до комп'ютерних ресурсів багатьох вітчизняних наукових центрів і лабораторій, утворюючи єдину обчислювальну мережу даних. Саме про таку сучасну комп'ютерну технологію в галузі медицини — грід-технологію — йдеться в запропонованій публікації. Її автори визначають суть грід-технологій як спосіб побудови середовища для колективних обчислень, що дозволяє використати під час розв'язання багатьох завдань безпрецедентно великі, географічно розподілені обчислювальні ресурси. Нині цю перспективну комп'ютерну технологію успішно запроваджують в установах НАН України. Однак іще більшої уваги та зусиль потребує її впровадження в медичну практику. Автори публікації доводять високу ефективність і перспективи грід-технології для вітчизняної науки, медицини, охорони здоров'я.

Формування структур інформаційного суспільства є сьогодні одним із пріоритетів нашої держави. Широке застосування новітніх технологій у всіх сферах життєдіяльності суспільства, особливо в медицині, потребує залучення потужних комп'ютерних і обчислювальних ресурсів, у тому числі у сфері збереження та оброблення експериментальних даних. Це питання відразу постало після прийняття в 1999

році рішення про спорудження в ЦЕРНі прискорювача частинок на зустрічних пучках LHC (Large Hadron Collider — великий адронний колайдер). Сподіваємося, що вже восени 2008 року великий адронний колайдер буде введено в дію. Обсяг даних, отримуваних щорічно під час експериментів на цьому найпотужнішому в світі прискорювачі, вражає. Це приблизно 15–20 мільйонів терабайтів. Для порівняння: зазначений

© ЗАГОРОДНІЙ Анатолій Глібович. Академік НАН України. Директор Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

МАРТИНОВ Євген Сергійович. Доктор фізико-математичних наук. Завідувач лабораторії цього інституту.

АВРАМЕНКО Володимир Іванович. Кандидат фізико-математичних наук. Провідний науковий співробітник НПП «Дитяча кардіологія і кардіохірургія» (Київ). 2008.

річний обсяг даних відповідає 20 мільйонам стандартних компакт-дисків. Для опрацювання такого надвеликого масиву даних запропоновано об'єднати комп'ютерні ресурси багатьох фізичних центрів і лабораторій у єдину обчислювальну мережу. Така мережа отримала назву «грід» (Grid), що в дослівному перекладі з англійської означає «ґрати», «сітка» [1–3]. Під грід-технологіями, відповідно до класичного визначення, розуміють середовище колективного комп'ютингу, яке власники передають у спільне користування. Обчислювальні ресурси можуть складатися з багатьох обчислювальних потужностей, архівів, баз даних та швидкісних каналів зв'язку. Наскрізне програмне забезпечення (отримало назву *middleware*) переформатовує це середовище в єдиний операційний простір. Зауважимо, що існують різні пакети *middleware*, наприклад NorduGrid або gLite. У європейських країнах як стандартне грідівське програмне забезпечення запропоновано використовувати gLite.

Фактично за допомогою грід-технологій віртуально утворюється потужний суперкомп'ютер. Швидкість обчислень й ефективність використання ресурсів віртуального комп'ютера зростає завдяки тому, що багато обчислювальних завдань можна розпаралелити, тобто виконувати одночасно на великій кількості процесорів. Крім того, відомо, що комп'ютери протягом доби більшу частину часу не працюють і в середньому завантажені на 5–10 відсотків. Ця проблема оптимального використання комп'ютерних ресурсів актуальна також для великих обчислювальних центрів. Такі ресурси можна інтегрувати в грід-середовище й використовувати більш ефективно, адже запропонована технологія базується на наявних високошвидкісних каналах зв'язку, що об'єднують просторово віддалені комп'ютери. Будь-яка грід-інфраструктура має три складники: 1) об-

числювальні ресурси, або грід-кластери; 2) спеціальне програмне забезпечення (*middleware*), яке керує всією інфраструктурою; 3) швидкісні канали зв'язку між обчислювальними кластерами.

Грід-технології відразу ж знайшли широке застосування в науці, медицині, освіті, бізнесі. За темпами розвитку грід-технології в останнє десятиріччя значно випереджають Інтернет. Одночасно вони дозволяють доповнити Всесвітню мережу можливостями доступу до обчислювальних ресурсів і створюють систему, яку умовно називають обчислювальним Інтернетом, хоча слід зауважити, що грід-технології — це не тільки обчислення. З'явився навіть новий термін «World Wide Grid — WWG», і в цьому сенсі грід-технології розглядають як еволюційне продовження Інтернету.

В Україні перший грід-кластер створила група фізиків із ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» у 2002 році. У 2004–2005 роках фахівці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова спільно зі співробітниками обчислювального центру Київського національного університету ім. Тараса Шевченка побудували потужний грід-вузол, який сертифіковано в AliEn-grid у ЦЕРНі. Ресурси цього грід-вузла внесені до проекту інформаційно-обчислювального забезпечення експериментів на прискорювачі протонів та ядер ЛНС. У межах виконання академічної програми впровадження грід-технологій протягом 2005–2007 років грід-кластери та грід-платформи доступу створені в 20 наукових закладах НАН України. Загалом комп'ютерні ресурси наукових установ академії становлять більше ніж 1200 процесорів і 120 терабайтів дискового простору. Детальнішу інформацію про грід-технології та їхній стан у НАН України можна почерпнути на веб-сайті Українського Академічного Гріду — <http://uag.bitp.kiev.ua> [4]. Здійснено перші кроки для застосування грід-технологій у медич-

ній теорії і практиці, зокрема Інститут теоретичної фізики надає свої обчислювальні ресурси НПЦ «Дитячої кардіології і кардіохірургії» та НПЦ «Променевої діагностики» для експериментального застосування грид-технологій у зберіганні та обробленні медичної інформації.

Формування академічної телекомунікаційної мережі, яка об'єднує грид-кластери НАН України і яку обслуговує науково-телекомунікаційний центр УАРНЕТ, проходить у кілька етапів. Протягом 2004–2006 років прокладено оптично-волоконну лінію завдовжки 1300 км Харків–Суми–Київ–Вінниця–Хмельницький–Тернопіль–Львів, яка приєднується до мережі PIONIER на кордоні з Польщею. На наступному етапі заплановано побудову магістральних каналів від Києва до великих регіональних центрів за кільцевою технологією. Технічно найефективнішим і дешевим рішенням є використання так званої лямбда-технології для наявних магістральних ліній. Це дозволить швидко об'єднати регіональні центри лініями зі швидкостями передавання інформації вище за 2.5 Гбіт/с. Як телекомунікаційну платформу для грид-проектів доцільно також використовувати науково-освітню мережу (Science & Education Networks) та підключитися до європейської мережі GEANT (Pan-European Backbone), що обслуговує наукові організації в 30 європейських країнах.

Зрозуміло, що робота з медичною інформацією має свої особливості. Історично першим прикладом упровадження грид-технологій для інформаційного супроводу медичних досліджень був проект MAMMOGRID (дослідження раку молочної залози – <http://mammogrid.vitamib.com>) [5]. Його розпочато у 2002 році для архівування досліджень молочної залози на базі двох британських і одного італійського госпіталю. Нині грид-мережею заплановано охопити основні клініки в Європі, де про-

водять мамологічні обстеження жінок, і надати доступ науковцям до даних цих обстежень. Такий аналіз може вивести наші знання на якісно новий рівень розуміння розвитку хвороби та підвищити достовірність обстежень на ранніх стадіях захворювання.

Відділ електронної медицини при Європейській комісії визначив кілька причин, які стимулюють упровадження грид-технологій:

- поліпшення якості обслуговування завдяки швидкій діагностиці, своєчасному лікуванню та мінімізації медичних помилок;
- зниження собівартості проведення діагностичних обстежень;
- зниження вартості лікування завдяки ранньому виявленню патологій і вибору оптимальної стратегії лікування.

Сьогодні розробляють широкомасштабні світові та європейські грид-проекти, зокрема азійський проект Medical Grid (<http://staff.aist.go.jp/epifanio.bagarinao/medgrid/>) створюють як грид-інфраструктуру, що об'єднує розподілені і зв'язані грид-мережею бази медичних даних, системи візуалізації для аналізу медичних зображень. Мета проекту Health-e-Child (www.health-e-child.org) – створення грид-інфраструктури для європейської педіатрії. Є й інші проекти, багато з них уже працюють або ж перебувають у процесі тестування, деякі ще на стадії розроблення.

Застосування сучасних інформаційних технологій у сфері охорони здоров'я має свої особливості через специфіку та спрямованість закладів на надання медичної допомоги, проведення діагностики, консультацій, у тому числі телемедичних, біомедичного моделювання, пошуку нових ліків, медичного приладобудування. Це коло робіт, залежно від способу застосування інформаційних технологій, можна розділити на дві групи: 1) для збережен-

ня, оброблення, аналізу та архівування медичних даних, що притаманно практичній медицині; 2) для моделювання з використанням обчислювальних потужностей у медичних дослідженнях.

Зрозуміло, є комплекс взаємопов'язаних завдань практичної медицини, вирішення яких стало можливим завдяки використанню інформаційних технологій: електронна картка пацієнта, медична інформаційна система, оброблення, архівування інформації та баз даних (PACS – Patient Archiving and Communication Systems та GMAS – Grid Medical Archive Solution), телемедицина [6–8].

Ще одним важливим сектором медицини, де використовують переважно обчислювальні потужності грид-технологій, є медичні дослідження геному людини, з пошуку нових ліків, моделювання біомедичних систем. Застосування грид-технологій у медичних дослідженнях залежить значною мірою від наявності комп'ютерних ресурсів, можливостей роботи з великими базами даних та розв'язування надскладних завдань. Яскравим прикладом ефективності грид-технологій є дослідження вірусу пташиного грипу H5N1, яке виконували в проєкті WISDOM (<http://wisdom.eu-egee.fr/avianflu>) у 2006 році в 17-и країнах. Завдання, що потребувало 82-х років обчислень на одному персональному комп'ютері, вирішили за допомогою грид-технологій та 1700 комп'ютерів упродовж чотирьох тижнів. Ще одним напрямом застосування грид-технологій є моделювання «віртуальної» людини. Біомедичні моделі мають багато внутрішніх взаємозв'язків, їхня еволюція пов'язана з перебігом складних фізичних і хімічних процесів, тому для моделювання таких систем необхідні великі обчислювальні ресурси та інтенсивні обрахунки. Моделювання «віртуальної» людини можна здійснити тільки

при наявності дуже великих обчислювальних ресурсів.

Сьогодні в медицині склалися в цілому сприятливі умови для впровадження інформаційних технологій. Але медичні інформаційні системи в цій галузі використовують фрагментарно, парк обчислювальної техніки застарілий, персонал має порівняно слабкі навички роботи з комп'ютерами, робота з медичними базами даних потребує оптимізації. Особливості введення медичної інформації полягають ще й у тому, що записи до медичних карток можуть вносити зі значними перервами, пацієнти змінюють місця проживання, користуються послугами різних клінік, дані потребують тривалого зберігання й мають конфіденційний характер.

Такий загальний стан у медичній галузі стимулює впровадження новітніх інформаційних технологій. Очікується, що протягом наступних трьох років сукупні витрати на застосування сучасних інформаційних технологій у медицині зростуть з 1 до 5 відсотків, а обіг коштів у цьому секторі медицини – з \$22 до \$348 млрд [9]. За прогнозами експертів, електронна медицина стає за обігом коштів третім сектором охорони здоров'я після фармацевтичної промисловості та виробництва медичного діагностичного обладнання.

Ще раз зазначимо, що обсяги медичної інформації величезні. Щороку тільки в Європі завдяки проведенню радіологічних обстежень у медичних центрах може накопичуватися кілька сотень Пбайт (1Пбайт=1000000 Гбайтів) оцифрованої інформації. Для збереження таких обсягів інформації необхідні величезні ресурси. Крім цього, архівування та збереження потребують також відеоматеріали, фотографії, записи біосигналів, текстові дані й інша документація про пацієнтів. До того ж медичну допомогу надають у різних за спеціалізацією медичних закладах: лікарнях,

пунктах швидкої та травматологічної допомоги, поліклініках, реабілітаційних центрах, санаторіях тощо. У кожному з таких закладів можуть бути свої форми запису медичної інформації. Інколи використовують несумісні формати і стандарти подання. Медична інформація неконсолідована, не переходить за пацієнтом із клініки в клініку. Ще одна особливість полягає в тому, що навіть при виконанні стандартних протоколів досліджень не завжди можна бути впевненим у тому, що повторні обстеження на іншому обладнанні, з іншим рівнем налаштування та обслуговування діагностичних систем, іншим досвідом та навичками роботи персоналу приведуть до ідентичних результатів.

Роботи щодо збереження, аналізу та оброблення медичної інформації навіть в однотипних клініках та лікарнях перебувають на різних стадіях упровадження інформаційних технологій. Одне з головних завдань інформатизації медичних закладів полягає в розробленні зручної медичної інформаційної системи та електронної картки пацієнта. У західноєвропейських та американських клініках широкозастосовані лікарняні медичні інформаційні системи для супроводу стаціонарних хворих. Інформаційні технології використовують значною мірою в лабораторіях та під час радіологічної діагностики, частково під час надання первинної допомоги.

У розвинених країнах, як черговий етап інформатизації медичної галузі, першорядними є питання застосування грид-технологій, але в Україні загальна ситуація суттєво відмінна — зроблено лише перші кроки щодо інформатизації медицини. В Україні впровадження інформаційних технологій відбувається переважно стихійно та хаотично. У деяких місцях інформаційні системи все-таки впроваджені, але це відбувається локально й переважно спрямоване на вирішення якогось конкретного питання.

На загальнодержавному рівні уніфіковані варіанти медичної інформаційної системи та стандартизована електронна картка пацієнта відсутні. Якщо відійти від досить сумного сьогодення й помріяти, то можна уявити в Україні таку інформаційно-медичну систему охорони здоров'я. Від першого дня життя кожна людина отримує медичну електронну картку (медичний паспорт), а її електронна копія зберігається в поліклініці, що обслуговує людину, та в державній базі даних. Після кожного візиту до будь-якого лікаря в ній фіксують нові дані про стан здоров'я людини. Аналогічні зміни вносять і до персональної картки. Вона містить повну інформацію про персональний геном людини, детальні результати всіх, навіть поверхових, медичних обстежень пацієнта, дані про можливі відхилення від норми або патології, рекомендації щодо лікування того чи іншого захворювання. Таким чином, незалежно від ситуації та від лікарського закладу, куди за допомогою звернулася людина, лікар протягом декількох хвилин отримує (з картки, або з бази даних) повну медичну інформацію про стан здоров'я пацієнта і може швидко прийняти необхідне рішення. За допомогою Інтернету він може в разі потреби терміново встановити контакт із поліклінікою, до якої пацієнт належить. Лікар, що працює на швидкій допомозі, завжди має при собі комп'ютер-ноутбук, на якому може прочитати електронний медичний паспорт пацієнта і за необхідності отримати потрібну інформацію з бази медичних даних.

Отже, електронна картка має супроводжувати людину протягом усього життя, містити інформацію про надану медичну допомогу, проведені лабораторно-діагностичні обстеження та «крокувати» за пацієнтом із клініки в клініку. Особливу увагу при цьому звертають на конфіденційність інформації. Для гарантування конфіденційності дані мають бути в закодованій

формі, а доступ до системи — авторизованим та автентифікованим. Архівування медичних даних чітко регламентоване європейськими та національними законами, деякі правові норми діють сьогодні і в Україні. Режим обмеженого доступу стосується всіх персональних даних про пацієнта або будь-якої їхньої частини, за якою особу можна безпосередньо ідентифікувати. Особливість медичної інформації полягає ще й у тому, що її несанкціоноване витікання може завдати суттєвої шкоди.

Одночасно необхідно забезпечити санкціонований доступ до інформації про конкретного пацієнта з будь-якого місця, оскільки медична допомога може знадобитися в будь-який час. Проте значна частина медичної інформації сьогодні ще електронно не оброблена, не має цифрового формату запису. Наприклад, основні показники стану організму, характеристики сприйняття, лабораторні аналізи хоча й записують у цифровому форматі, але вони майже недоступні для подальшого оброблення. Обслуговування електронних карток пацієнтів потребує значних ресурсів для зберігання та оброблення медичних даних. З метою мінімізації витрат на утримання інформаційних систем щораз більше зростатиме потреба в послугах комп'ютерингу. Нагально постає питання стандартизації при передаванні інформаційних потоків, комутації обладнання та прийнятті спільного для медичних даних цифрового формату. Створення єдиної медичної інфраструктури обчислювальних ресурсів і баз даних приведе до формування нових послуг, в основі яких буде дистанційний компонент: діагностика, оброблення медичних зображень, дослідження основних показників стану організму, оцінення клінічних результатів пацієнта, аналіз і оброблення великих масивів інформації. Однак багато лікарень неохоче йде на передавання інформації за межі закладів. Стимул з'явиться, коли буде забез-

печено такий режим доступу до інформаційних ресурсів, який надасть можливість працювати з медичними базами даних у режимі загального доступу.

Зауважимо, що медична інформаційна система має бути достатньо гнучкою для налаштування програмного забезпечення під вимоги конкретного лікувального закладу відповідно до специфіки його роботи та спеціалізації. Програмний продукт має бути достатньо простим у використанні, із сумісним інтерфейсом і типовим відображенням даних, з уніфікованою системою навігації, інтегральним характером побудови та модульною структурою програмного алгоритму. Залежно від конфігурації системи необхідно, щоб модулі були достатньо автономні й працювали як у складі всього програмного комплексу, так і окремо. Інтегральний характер системи має передбачати можливість її розширення без радикальної зміни програмного алгоритму, доповнення окремих вузлів і без порушення цілісності даних та працездатності системи, модернізації, заміни та вилучення апаратних ресурсів або застарілого обладнання. Такий підхід до формування інформаційних систем особливо актуальний для медицини, оскільки медична інформація має зберігатися десятиліттями, тобто набагато довше від самих носіїв інформації.

У практичній медицині впровадження грид-технологій дає змогу сформуванню програмне середовище, сумісне з різними розробками PACS-систем для архівування та збереження інформації, засобами зберігання даних на носіях різних виробників і на різних серверах. Проте сьогодні існує ряд обмежень щодо застосування PACS-систем, які пов'язані з відсутністю відкритих стандартів для комутації різних PACS. Навіть у європейських та американських клініках управління даними здійснюють переважно всередині однієї установи (один госпіталь

або асоціація госпіталів) без виходу на національний або міжнародний рівень.

Минулого року на основі грид-технологій розв'язання проблеми комутації різних PACS-систем запропонували компанії IBM та Bycast (www.bycast.com). Система отримала назву Grid Medical Archive Solution (GMAS). У ній відокремлено інфраструктуру для зберігання та архівування даних (PACS-система) від самих баз даних. На підставі нових інформаційних рішень лікарні через свої комутаційні мережі зв'язку та PACS-системи отримали можливість звертатися до розподілених баз інформації, спільного використання ресурсів зберігання, а також оптимізації рівня завантаження обладнання, підвищення швидкості та надійності доставки інформації, спрощення схем управління й зменшення сукупних витрат на зберігання інформації. Відсутність жорсткої прив'язки баз даних до носіїв зберігання інформації та обладнання, а також диференційований інтелектуальний режим доступу до баз даних радикально знижують сукупну вартість підтримки інформаційних ресурсів.

Формування баз даних медичних досліджень відразу ж ставить питання про раціональне використання інформації. Для цього недостатньо механічно об'єднати розподілені бази даних. До того ж не вся інформація в цих базах сумісна не тільки за форматом, але й через відмінність у процедурах, медичному обладнанні, людський фактор. Інформаційні системи мають бути налаштовані на роботу з базами даних для раннього розпізнавання хвороб, визначення груп ризику населення, пошук нових ліків. Результатом упровадження GMAS-систем є вихід на якісно вищий рівень діагностики та лікування пацієнтів, що закладає основи створення інформаційної медицини. Електронне оброблення інформації відкриває нові можливості для надання якісної медичної допомоги, забезпечує більший до-

ступ населення до сучасних медичних послуг за умов обмеженого бюджету.

Значний поштовх щодо впровадження грид-технологій отримала телемедицина. Перші спроби використання каналів зв'язку для надання медичної допомоги відбулися ще на початку XX століття в Швеції для передавання електрокардіограм по телефонних лініях. У 60-70 роках у СРСР в Інституті хірургії ім. О. Вишневського проводили перші клінічні випробування передавання по телефону медичних даних для дистанційної діагностики вроджених вад серця та інших захворювань. Першою країною, де широко використовували можливості телемедицини, стала Норвегія, яка має велику кількість важкодоступних місць для надання медичної допомоги. Другий проект упроваджено у Франції для моряків цивільного та військового флотів. Сьогодні в Європі вже важко назвати країну, де б телемедицину не впроваджували тією чи іншою мірою. Особливого розвитку вона набула в США, Канаді та Росії. Нині у світі відомо більше як 250 телемедичних проєктів. Роль телемедицини зростає ще й тому, що кожен пацієнт має право знати іншу думку, отримати консультацію інших спеціалістів. З упровадженням грид-технологій можливості телемедицини значно розширюються. За допомогою засобів інформаційних технологій можна зафіксувати будь-яке зображення, підготувати його для передавання на будь-яку відстань у режимі реального часу або в межах розумного часового інтервалу та розшифрувати для обговорення майже без втрати якості. Ці досягнення в телемедицині зумовлені тим, що на зміну аналоговому телебаченню прийшли цифрові канали зв'язку. Стало можливим у режимі реального часу проводити дистанційні обстеження, медичні консультації, консиліуми й одночасно передавати електронну історію хвороби разом із лабораторною та діагностичною інформацією, фотографі-

ями, знімками тощо. Традиційним напрямом для застосування телемедицини залишається проведення консилиумів, дистанційного навчання, конференцій, нарад. Прикладом поєднання засобів телекомунікацій із медичною практикою є створення віртуальних госпіталів. У проекті віртуального Європейсько-Середземноморського госпіталю (Virtual Euro-Mediterranean Hospital, www.emisphere.org/) запропоновано об'єднати клініки 5 європейських (Палермо, Афіни, Клермонт, Берлін, Париж) та 5 середземноморських міст (Касабланка, Алжир, Туніс, Каїр, Нікосія) каналами швидкісного волоконнооптичного зв'язку для проведення телемедичних конференцій, діагностики, консультацій, дистанційного навчання. При цьому висловлено пропозицію поряд із відеосигналом передавати діагностичні обстеження та їх результати.

Сьогодні грид-технології впроваджують у медичні дослідження в усьому світі. Можна навести кілька віртуальних організацій, які виступають координаторами таких досліджень: Global Grid Forum (<http://www.ggf.org>), Grid Globus Alliance (<http://www.globus.org>), Folding@Home (<http://folding.stanford.edu>). Проект World Community Grid (<http://www.worldcommunitygrid.org>) використовує вільні обчислювальні ресурси персональних комп'ютерів з усього світу й ставить за мету створити з цих ресурсів найбільшу у світі грид-інфраструктуру для розв'язання завдань, що потребують гіперресурсів. Нині в реалізації проекту бере участь понад 330 тисяч учасників. Проект об'єднує більше ніж 780 тисяч комп'ютерів із 650 млн комп'ютерів, наявних у світі. Будь-хто може ввійти до цієї мережі й надати для спільного користування свої ресурси, адресу для реєстрації та комутації (<http://www.worldcommunitygrid.org/>).

Використання грид-технологій у дослідженнях для пошуку нових ліків, біомодельовання, дослідження спадкових та епіде-

міологічних хвороб, раку так чи інакше зводяться до спільної основи — вивчення геному людини. Так само як, скажімо, рівняння Максвелла описують усе розмаїття електромагнітних явищ, а рівняння Шредингера — усю гаму квантомеханічних ефектів, так і у вивченні геному людини можна буде знайти відповіді на величезну кількість питань сучасної медицини. Одним із наймасштабніших науково-дослідних проектів вважають проект «Геном людини» (Human Genome Project, www.ornl.gov/sci/techresources/Human_Genome/home.shtml), у якому всі розрахунки визначення складу і структури генів виконували потужні суперкомп'ютери. На різних етапах виконання проекту були задіяні тисячі фахівців із усього світу: біологи, хіміки, математики, фізики, програмісти й техніки, десятки наукових організацій. Це один із найдорожчих наукових проектів у історії. Тільки за період із 1990 р. до 1998 р. на нього було витрачено більше як \$1,5 млрд. Цікаво простежити історію цього проекту, яка починалася в 1990-х рр. на тлі стрімкого розвитку комп'ютерних технологій. Геном людини, тобто сукупність усіх генів і міжгенних ділянок ДНК, за оцінками фахівців, складається з 20–25 тисяч генів. Будь-яке порушення записаної в генах інформації веде до мутацій. Із 10 тисяч відомих захворювань людини майже 3 тисячі — це спадкові хвороби. Звідси такий інтерес до геному людини й виток його повномасштабних наукових досліджень. Виявити всі гени в геномі та встановити відстані між ними — означає локалізувати кожен ген у хромосомах. Такі генетичні карти, крім інвентаризації генів і визначення їхніх положень, відповідають на винятково важливі питання про те, як гени визначають ті або інші ознаки організму. Число хромосом та їхня довжина різні в різних біологічних видів. У клітинах бактерій лише одна хромосома. Так, розмір

геному бактерії *Mycoplasma genitalium* – 0,58 Мб (Мегабаза – від англійського слова «base» – основа), у бактерії кишкової палички *Escherichia coli* в геномі 4,2 Мб, у рослини *Arabidopsis thaliana* – 100 Мб, у плодової мушки *Drosophila melanogaster* – 120 Мб. Найменша хромосома людини має ДНК довжиною 50 Мб, а найбільша (перша хромосома) – 250 Мб. До 1996 р. найбільша ділянка ДНК, яка була виділена з хромосом за допомогою реактивів, мала довжину 0,35 Мб. На найкращому устаткуванні структуру генів розшифрували зі швидкістю 0,05–0,1 Мб на рік при вартості \$1–2 за основу. Іншими словами, тільки на цю роботу знадобилося б приблизно 30 тис. днів (майже століття) і \$3 млрд.

Прорив у вирішенні питання розшифрування геному людини пов'язаний із роботами Крейга Вентера [10], у розпорядженні якого опинився величезний парк комп'ютерів, що вважали тоді другим за потужністю у світі. Триста суперкомп'ютерів цілодобово обробляли величезні масиви даних. Вентер увів метод визначення послідовності ДНК, пізніше названий «методом безладної стрілянини». Суть його в тому, що для визначення послідовності генів певну ДНК розбивають на безліч невеликих фрагментів, кожний із яких досліджують окремо. Як аналогію можна навести приклад: якщо потрібно просапати багато рядків на овочевому лані, то швидше це зробить не окрема людина, а бригада з кількох працівників. Після того як визначено послідовності кожного фрагмента, у дію вводять складні комп'ютерні програми, які заново збирають вихідну послідовність. У червні 2000 року Крейг Вентер і Френсіс Колінз, керівники проекту «Геном людини», оголосили про першу реконструкцію повного геному людини. У лютому 2001 р. міжнародний консорціум науковців із США, Великобританії, Франції, Німеччи-

ни, Японії й Китаю оприлюднив результати своїх досліджень геному людини. Протягом наступних років різні групи вчених у всьому світі періодично звітували про результати роботи щодо розшифрування геному людини. Так, у 2003 р. було оголошено про повне розшифрування ДНК, залишалася нерозшифрованою тільки перша хромосома людини. У травні 2006 р. дослідники з Wellcome Trust Sanger Institute разом із американськими й англійськими колегами оголосили про закінчення останнього етапу роботи з розшифрування першої, найбільшої, хромосоми людини. У її послідовність входять 223569564 нуклеотидні основи, що становить приблизно 8% від людського геному. Вона кодує в два рази більше генів, ніж середня людська хромосома. Мутації в першій хромосомі лежать в основі більше ніж 350 захворювань, у тому числі й деяких видів раку, хвороб Альцгеймера та Паркінсона, гіперліпідемії, муковисцидозу тощо. Це особливо важливо для ранньої діагностики хвороб, тому що діагностувати сьогодні подібні захворювання можна тільки після появи клінічних симптомів. Генетичні тести також можуть бути використані для виявлення груп людей, схильних до діабету II типу, астми, остеопорозу, емфіземи, деяких видів раку. Увесь цей величезний масив інформації міститься в режимі вільного доступу в численних базах даних та електронних бібліотеках.

Розшифрування геному людини в перспективі відкриває можливості лікувати не хворобу, а конкретного хворого. Тобто в майбутньому можна буде втілити мрію про персоналізовану медицину, коли діагностика й лікування могли б повністю враховувати генетичну індивідуальність людини. Щоправда, для цього необхідно розшифрувати геном конкретної людини. З повного генетичного профілю конкретної людини можна буде оцінити вроджені схильності

до тих чи інших хвороб і точно підібрати медикаментозну терапію. Сьогодні такий генетичний профіль коштує майже \$2 млн. У кожної людини ДНК різна, а розшифрований у межах проекту «Геном людини» геном — це лише зразки ДНК випадково відібраних людей. Потреба в таких дослідженнях величезна. Нещодавно з'явилася інформація, що сучасні ліки неефективні при лікуванні депресій у 40% випадків, артозів — у 50%, мігрені — у 60%, виразки шлунка — у 70%, гіперліпідемії, бронхіальної астми, цукрового діабету, артеріальної гіпертензії, шизофренії — у 75%. Така реакція людини на ліки може бути викликана різними причинами, але, за оцінками фахівців, генетичні фактори зумовлюють від 20 до 95 відсотків негативної реакції. Поки що ДНК-діагностика обмежується кількома сотнями тестів на хвороби з більш-менш визначеною генетичною природою.

Для персоналізації лікування медицині ще необхідно пройти довгий шлях досліджень і контрольних експериментів, знайти способи радикального прориву в напрямі прискореного та фінансово доступного розшифрування геному конкретної людини. Сьогодні найшвидший секвенатор ДНК (пристрій для розшифрування генетичного коду) в університеті Сент-Луїса в США працює в 400 разів швидше від колишніх моделей, опрацьовує 800 тисяч нуклеотидів на добу, але навіть при такій швидкості на розшифрування, наприклад, першої хромосоми конкретної людини буде потрібно 280 днів безперервної роботи.

Грид-технології з успіхом були використані також для аналізу властивостей гена ACE, скорочену назву якого перекладають як ангіотензин-конвертувальний фермент, що виробляє ангіотензин, негативна дія якого на стінки артерій призводить до гіпертонії. Відносно давно були знайдені блокатори ферменту ACE, проте їхня дія недостатньо ефективна. Ці ліки продають в ап-

теках як засіб від підвищеного тиску. Аналіз геному дав змогу виділити ген ACE-2, який кодує більш поширений і ефективний варіант ферменту. Пізніше було визначено віртуальну структуру білка і підібрано хімічні сполуки, що активно блокують білок ACE-2. Так, було знайдено новий препарат проти підвищеного артеріального тиску, причому за вдвічі менший час та вартість пошуку \$200 млн замість прогнозованих \$500 млн.

Інший проект TGCA (The Cancer Genome Atlas, США, <http://cancergenome.nih.gov/>) спрямований на розшифрування й складання систематизованого каталогу послідовностей нуклеотидів ДНК ракових клітин (близько 50 типів). На виконання проекту заплановано протягом 9 років залучити з бюджету США кошти в обсязі \$1,35 млрд.

Сьогодні вже створені карти геномів і розшифровані послідовності ДНК ряду сільськогосподарських рослин, хвороботворних бактерій і вірусів, дріжджів, азотфіксувальних бактерій, малярійного плазмодія й комарів. Біологи сподіваються провести повну класифікацію тварин і рослин шляхом створення генетичних штрих-кодів, за якими можна було б визначити будь-який вид шляхом зіставлення характерного для нього фрагменту геному. Це значно полегшить виявлення нових біологічних видів, адже «традиційне» дослідження міжвидових розходжень вимагає багато часу й спеціальних знань. Сьогодні відомо 1,5 млн видів тварин і 0,5 млн видів рослин, а, за деякими оцінками, число невивчених видів перевищує відомі більш як у 4–5 разів.

Мережа World Community Grid є першим віртуальним суперкомп'ютером, який надає свої ресурси для досліджень із пошуку нових ліків та методів лікування від СНІДу — проект FightAIDS@Home (<http://fightaidsathome.scripps.edu/>). Його виконують спільно з Інститутом Скрипса (Scripps Research

Institute). У проекті вивчають можливі взаємозалежності та взаємозв'язки між трьома тисячами амінокислот ВІЛ, зразки яких взяті від інфікованих осіб, та сотнями типів імунних систем людей. За спеціальними тестами перевіряють вірогідні зв'язки між зразками вірусу й типами імунних систем. Кількість молекул потенційних ліків, так само як і кількість можливих мутацій ВІЛ-білків, неймовірно велика. Ці дослідження вимагають колосальних комп'ютерних ресурсів для перевірки мільйонів варіантів моделей мутацій вірусу.

Підсумовуючи викладене, можна констатувати, що ефективність використання новітніх інформаційних технологій у медицині безпосередньо залежить від рівня розуміння суспільством тенденцій розвитку сучасної медицини й науки в цілому, від готовності медиків, фізиків, математиків та інженерів до співпраці щодо впровадження нових технологій у цю важливу галузь охорони здоров'я людини.

1. *Foster I., Kesselman C., Tuecke S.* The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations // *International Journal of High Performance Computing Applications*, 15 (3), 200–222, 2001 (<http://www.globus.org/research/papers/anatomy.pdf>).
2. *Foster I., Kesselman C., Tsudik G., Tuecke S.* A Security Architecture for Computational Grids // *Proc. 5th ACM Conference on Computer and Communications Security Conference*, p. 83-92, 1998 (<ftp://ftp.globus.org/pub/globus/papers/security.pdf>).
3. *Загородній А.Г., Зин'єв Г.М., Мартинов Є.С., Шадура В.М.* ГРІД – нова обчислювальна технологія для науки // *Вісник НАН України*. – 2005. – № 6. – С. 17–19.
4. Матеріали виїзного спільного засідання Комітету Верховної ради України з питань науки і освіти та Консультативної ради з питань інформатизації при Верховній Раді України. – К.: Совтпрес, 2007 – 208 с.
5. *Warren R., Solominides A.E., del Frate C., Warsi I., Ding J., Odeh M., McClatchey R., Tromans C., Brady M., Highnam R., Cordell M., Estrella F., Bazzocchi M., Amendolia S.R.* MammoGrid – a prototype distributed mammographic database for Europe // *Clin. Radiol.* – 2007. – Vol. 62(11). – P. 1044–1051.

6. *Hasting S., Oster S., Langella S., Kurs T., Pan T., Catalyurek U.V., Saltz J.H.* A grid based image archival and analysis system // *Am. Med. Inform. Assoc.* – 2005. – Vol. 12. – №3. – P. 286–295.
7. *Ходжибаев А.М., Адылова Ф.Т.* Новейшие информационные ГРИД-технологии в электронной медицине // *Укр. журнал телемед., мед., телемат.* – 2005. – Т.3. – №1. – С. 23–24.
8. *Erberich S.C., Silverstein J.C., Chervenak A., Schuler R., Nelson M.D., Kesselman C.* Globus Medicus – Federation of DICOM Medical Imaging Devices into Healthcare Grid // *Stud. Health Technol. Inform.* – 2007. – Vol. 126. – P. 269–278.
9. *Vincent Breton, Kevin Dean, Tony Solomonides.* The Healthgrid White Paper (<http://clrwwww.in2p3.fr/PCSV/IMG/pdf/WP%20IOS%20complete.pdf>).
10. *Creg Venter J.* A life Decoded. My Genome: My Life, Penguin group. – USA, 2007. – 400 p.

В. Авраменко, А. Загородній, Є. Мартинов

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГРІД-ТЕХНОЛОГІЙ В МЕДИЦИНІ

Резюме

У статті проаналізовано деякі питання застосування грід-технологій у медицині. Їхню суть викладено як спосіб побудови середовища для колективних обчислень, що дозволяє використати при розв'язанні багатьох завдань безпрецедентно великі, географічно розподілені обчислювальні ресурси. Відзначено, що в НАН України грід-технології вже існують і розвиваються. Детально обговорено специфіку роботи з медичною інформацією та аргументовано необхідність застосування грід-обчислень у медичній практиці. Наведено приклади того, що зроблено в цьому напрямі у світі, підкреслено високу потенційну ефективність і перспективи грід-технологій для медицини.

В. Авраменко, А. Загородній, Є. Мартинов

PECULIARITIES OF GRID-TECHNOLOGY APPLICATION IN MEDICINE

Summary

Some problems of grid-technology applications in medicine are analyzed in the article. A matter of grid-technology as a method to create common computing environment, which allows involving extra powerful geographically distributed computing resources for solving many tasks, is described. It is noted that grid-technologies in NAS of Ukraine already exist and are developed. The special features of medical grid-applications are discussed in details, the necessity of grid computations application in medical practical activity is substantiated. The examples of the medical applications in the world are given, high potential efficiency and prospects of grid-technologies for medicine is emphasized.