

КРАТКО ОПИСАНИЕ НА НАЙ-ВАЖНИ ПОСТИЖЕНИЯ

чл.-кор. Светозар Димитров Маргенов

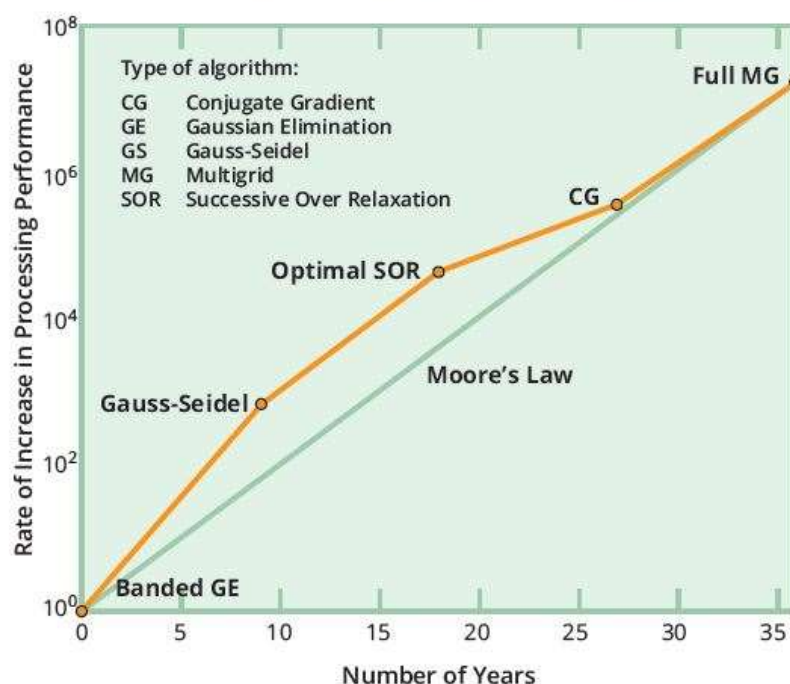
кандидат в конкурс за академици на БАН в област Природоматематически науки,
научно направление Математически науки

1. Научни постижения

1.1. Въведение

Числените методи и алгоритми за решаване на задачи на изчислителната линейна алгебра с разредени матрици имат определяща роля за математическото и компютърно моделиране на процеси, които се описват с диференциални уравнения. Това с особена сила се проявява при задачи с голяма дискретна размерност. Понятието *голяма размерност* се променя с развитието на технологиите и при постоянно растящата производителност на изчислителната техника. И независимо от огромния прогрес в това отношение, решаващи за развитието на компютърното моделиране са постиженията в областта на числените методи и алгоритмите за тяхната реализация. На фигурата е показано съотношението между експоненциалното увеличаване на бързодействието на компютрите (закон на Мур, 1970) и ръста на производителността на числените методи на линейната алгебра за период от 35 години.

Improvements in Algorithms Relative to Moore's Law



Съвременното разбиране за задачи с голяма размерност се определя от брой на неизвестните от порядък 10^8 - 10^{10} и дори 10^{12} . Такъв клас задачи са предмет на изследване в направлението от изчислителната математика, което следвайки възприетата в английския език терминология, наричаме *научни пресмятания за задачи с голяма размерност* (Large-Scale Scientific Computations).

Нека разгледаме например елиптична гранична задача и нека за нейното числено решаване е приложен метод на крайните елементи или друг подходящ мрежов числен метод. При много общи предположения, непрекъсната задача се свежда до система от линейни алгебрични уравнения със симетрична, положително определена и разрежена матрица **A**, която в метода на крайните елементи се нарича *матрица на коравина*. Тези свойства са в основата на ефективните итерационни методи за решаване на системи от вида **A** **u** = **b**. Съвременните итерационни методи се формулират в термините на пространства на Крилов, породени от матрицата **A**. Методът на спрегнатия градиент с преобуславяне (PCG) е най-добрият измежду известните базови методи за разглеждания клас задачи.

Съществена част от научните и научно-приложни приноси на кандидата са свързани с конструиране, изследване и прилагане на високоефективни методи и алгоритми за преобуславяне. Стратегията за преобуславяне се формулира с помощта на следните условия за преобуславящата матрица **C**: а) относителното (спектрално) число на обусловеност е съществено по-малко от числото на обусловеност на изходната матрица, т.е. $\kappa(\mathbf{C}^{-1}\mathbf{A}) \ll \kappa(\mathbf{A})$; б) съществува ефективен алгоритъм за решаване на системи с преобуславящата матрица (преобусловителя) **C**.

През последните години, много от най-силните резултати на кандидата са в областта на числените методи за уравнения, включващи дробна степен на оператора на дифузия. Преходът от числени методи за разреждени матрици към плътни матрици от вида **A**^α е фундаментален. Тук приносите са свързани със замяна на полиномиалната апроксимация на **A**⁻¹ (метод на спрегнатия градиент и съответно PCG) с рационална апроксимация на **A**^α, използвана в предложението и анализиран от кандидата метод BURA.

Отправна точка в методологията на изследване е изчислителната сложност. Тя се определя от скоростта на сходимост (съответно оценката на грешката) и ефективността на алгоритмите. Представените резултати имат конструктивен характер, като предложените и изследвани методи са с ясна алгоритмична структура. Това дава възможност за оценка на броя на аритметичните операции. Най-висока стойност имат методите за които са доказани оптимални оценки за скоростта на сходимост, при което изчислителната сложност е също оптимална, т.е. имат асимптотика $O(N)$, където N е размерността на дискретната задача. Доказателствата са при строга математическа формулировка, като голяма част от получените оценки са точни.

От 195 работи в общия списък, за участие в конкурса са избрани 68, в това число 2 монографии. От тях, в списания с Impact Factor (IF) са 48 публикации, като други 8 са в издания с SJR Index (**SJR**). От тези 68 работи, през последните 5 години (вкл. 2024 г.) са публикувани 11 (всички с IF).

Резултатите са представени в следващите 6 раздела.

1.2. Оптимални многонивови методи за конформни крайни елементи

В това направление са работи [20,21,23,24,27,31,34,38,40,49,56,60,64,66,67,68]. В тях са изследвани алгебрични многонивови методи от тип AMLI (Algebraic MultiLevel Iteration) и техни развития и интерпретации в контекста на методи в спомагателни подпространства. Те представляват рекурсивно обобщение на мултипликативни и адитивни алгебрични двунивови методи, където допълнението на Шур се апроксимира с локално дефинирана разреждана матрица, която в случая на йерархичен базис е (или може да се интерпретира като) матрицата на коравина, съответстваща на предходното ниво на дискретизация. За получаване на оптимална скорост на сходимост се използва стабилизиращ полином на Чебишев, включен в апроксимацията на допълнението на Шур. Константата $\gamma \in [0,1)$ в усиленото неравенство на Коши-Буняковски-Шварц (КБШ) се дефинира в рамките на рекурсивно въведените двунивови разделяния. Тя има фундаментална роля в анализа на скоростта на сходимост и при доказване на твърдения за оптималност на изчислителната сложност. При AMLI методите за първи път са доказани оценки за оптимална сходимост, при които не налагат условия за (допълнителна) регулярност на решението на граничната задача. Такъв тип резултати са публикувани за първи път в [68], където е предложен многонивов метод без стабилизиращ матричен полином с почти оптимална оценка за броя на итерациите от вида $O(\log N)$. В статии [23,29,31,34,38,56,61,67] са доказани равномерни оценки за константата в усиленото неравенство на КБШ. Така например в [56] е доказано, че за линейни крайни елементи на Курант $\gamma^2 < 0.75$ при най-общи предположения за коефициентна и мрежова анизотропия, като в [66] за пръв път са получени оптимални резултати за задачи с променливо направление на доминираща ортотропия. В статия [67] е доказана оценка за константата на КБШ за системата от уравнения на Ламе (линейна теория на еластичността), която е равномерна относно коефициента на Поасон в почти несвиваемия случай. Статии [66,67] са основополагащи за изследванията в областта на робастните многонивови методи, на които са посветени обзорните работи [27,49], както и монографията [40]. В [31,61] е получена характеристикация на многонивови методи от тип SC AMLI (Semicoarsening AMLI) за билинейни, биквадратични и бикубични крайни елементи, като са определени параметри, осигуряващи оптималност. За първи път оптимален SC AMLI за тримерни елиптични задачи е представен в [23]. Полученият в [61] SC AMLI метод за уравненията на Ламе продължава да е единственият до момента резултат с оптимална изчислителна сложност и равномерни оценки относно коефициента на Поасон в почти несвиваемия случай. В работи [34,38] са изследвани AMLI методи за линейна комбинация на матрицата на маса и матрицата на коравина. Получените равномерни оценки дават възможност за конструиране на оптимални методи за решаване на системи, възникващи при неявна дискретизация по времето на параболични задачи. Резултати от по-различен тип са представени в статия [64], където предмет на изследване е бихармоничното уравнение. Разработените методи не са оптимални, но имат висока ефективност за този клас задачи, свързани с численото решаване на стационарни уравнения на Навие-Стокс при големи числа на Рейнолдс. Ще отбележим също така статия [60], където са получени резултати за числено решаване на уравненията на Ламе, в случая на коефициентна нелинейност, където успешно са комбинирани

метода на разделяне по премествания (на базата на второто неравенство на Корн) с ефективен AMLI метод за получената блочно-диагонална матрица.

В края на този раздел ще разгледаме получените принципно нови резултати за задачи със силно нееднородни коефициенти, скоковете на които не са съгласувани с интерфейсите на началната мрежа на дискретизация. В този случай не е приложим подхода на йерархични базиси (подпространства). В [20] е изследван мултигрид метод с аналитично представяне на оператора върху окрупнената мрежа. В [22,23] са получени качествено нови резултати, които се основават на локални апроксимации на допълнението на Шур, като в [22] е публикувана обща теория на този клас методи. Такъв тип резултати в завършен вид са представени в [18]. Те включват робастна оценка на грешката при дискретизация със смесен метод на крайните елементи. Конструираният адитивен преобусловител за линейната системата със седлова точка е на базата на AMLI метод с локална апроксимация на допълнението на Шур в пространства $H(\text{div})$.

1.3. Оптимални многонивови методи за неконформни крайни елементи

Към това направление се отнасят публикации [27,29,30,34,35,36,38,40,44,45,47, 51,53,54,58]. Интересът към неконформните крайни елементи се определя от техните преимущества, като средство за числено решаване на лошо обусловени задачи, зависещи от *малък параметър*. Така например, известно е че стандартните конформни елементи не са подходящи за апроксимация на решението при силно нееднородни среди с големи скокове на коефициентите. Тук ролята на неконформните елементи на Крозе-Равиа се определя от факта, че те са еквивалентни на смесен метод на крайните елементи при устойчива (локално консервативна) апроксимация в пространство на Равиа-Тома. В същото време, конструирането на многонивови преобусловители в неконформния случай е затруднено от факта, че крайноелементните пространства, съответстващи на вложени мрежи (триангулации), не са вложени. Теорията на AMLI методите за линейни неконформни елементи е разработена в [47,53,54]. Доказани са оценки за константата в усиленото неравенство на КБШ, оценки за локално конструирани апроксимации на водещия блок в рекурсивно дефинираните йерархични двунивови матрици, както и характеристика (наредба) на класове от методи за агрегиране. Както в случая на конформни крайни елементи, оценките са равномерни относно мрежовата и/или коефициентна анизотропия. Следваща стъпка в това направление са получените в [38,39] оптимални резултати за неконформни крайни елементи на Ранахер-Турек. Тъй като тези елементи са завъртени билинейни/трилинейни, при конструирането на йерархичен базис са преодолен нов тип проблеми, като са намерени условия за участващите параметри, при които възникващите нелинейни уравнения имат решение. В статии [34,38] са изследвани AMLI методи за параболични задачи. Получени са нови робастни резултати за силно анизотропни задачи, като са доказани преимущества на неконформните елементи на Крозе-Равиа. Тези резултати, в комбинация с предложените в [51] AMLI методи за граф-Лапласиани са използвани в [29,35], където са получени оптимални многонивови методи за нестационарното уравнение на Навие-Стокс. Приближаването на скоростите с неконформни линейни елементи осигурява локално консервативна

апроксимация, което в комбинация с оптималните AMLI методи води до оптималност и робастност при големи числа на Рейнолдс, както на метода на крайните елементи, така и на итерационните методи за решаване на възникващите системи от линейни алгебрични уравнения. В същия дух е и работа [58], където робастната апроксимация с елементи на Крозе-Равиа на уравненията на Ламе при гранични условия на Дирихле се съчетава с оптимален двунивов преобусловител. Тук робастност означава, че оценките са равномерни относно коефициента на Поасон в критичния, както за теорията така и за числените методи, почти несвиваем случай. В края на този параграф ще отбележим работа [30], където са получени за първи път принципно нови резултати за задачи в екстремно хетерогенни среди с големи скокове на коефициентите (*висока честота и голям контраст*) при дискретизация с прекъснат метод на Галъоркин.

Голяма част от резултатите в първите две направления са систематично представени и анализирани в монографии [40,48], което в особено висока степен се отнася за първата от тях, както и в обзорните статии [24,49].

1.4. Методи използващи непълна факторизация или точна факторизация на специални класове матрици

Преките методи за решаване на системи от линейни алгебрични уравнения (включително метода на Гаус) могат да се представят като \mathbf{LU} факторизация на матрицата на системата. В общия случай, разредеността на матрицата се нарушава в процеса на факторизация. Идеята на методите, използващи непълна факторизация, се свежда до намиране на приближения на множителите \mathbf{L} и \mathbf{U} , които са разредени. Така получената матрица се използва в качеството на преобусловител. Към този клас причисляваме резултатите публикувани в [41,43,48,50,57,61]. Класическите методи за непълна факторизация се прилагат успешно в случая на \mathbf{M} -матрици. Такива матрици се получават например при дискретизация на изотропни елиптични гранични задачи с линейни триъгълни крайни елементи върху триангулации, в които няма тъпи ъгли. Една възможност за тяхното използване при по-общи предположения е с помощта на спомагателна \mathbf{M} -матрица, която е спектрално еквивалентна на дадената. В [41] са получени точни локално оптимални оценки за случая на неконформни елементи на Ранахер-Турек, като в [47] непълната факторизация за уравненията Ламе е комбинирана с метод на декомпозиция по премествания. Ще отбележим също така работа [50], където е изследвана елиптична гранична задача, дискретизирана с линейни неконформни елементи. Принципно различен подход на конструкция и анализ е приложен [62], където е изследван метод от тип BSR BILU. Тук непълната факторизация е блочна, като приближения на обратните матрици на съответните допълнения на Шур се получават, като се решават системи, съответстващи на мрежи със съществено по-малка размерност (Block Size Reduction).

В работи [48,63,65] се прилага алтернативен подход, като за преобусловител се използват спомагателни матрици, за които съществува подходяща точна факторизация. Предложен е и е изследван метод на циркулантна блочна факторизация. Специално внимание заслужава конструирания в [61] почти оптимален метод, при който се използва периодично продължение на изходната гранична задача на Дирихле.

В последните работи посветени на многонивови преобусловители [22,34], ключово място играят конструираните и изследвани локални непълни факторизации на водещите диагонални блокове в AMLI метода.

1.5. Числени методи за уравнения, които включват дробна степен на дифузионен оператор

В това направление са публикации [1,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,15]. Известни са бележки посветени на пресмятане на $D^{1/2}u(x)$ още в кореспонденция на Лайбниц до Бернули и Лопитал от 1695 г. Развитието на теорията на дробните производни е свързано също така с имената на Ойлер, Лиувил и Риман. В наши дни, големият интерес към задачи с дробна степен на дифузионния оператор (дробна дифузия) е свързан с изследвания на нелокални математически модели. Така например, дробният Лапласиан на степен $0 < \alpha < 1$ описва процес на субдифузия.

Представените в това направление работи са посветени на методи за решаване на многомерни задачи ($d > 1$) при най-общи предположения за геометрията на изчислителната област. Първи резултати от този клас са публикувани след 2014 г. Известни са три различни подхода, при прилагането на които нелокалната d -мерна задача се свежда до еквивалентна локална задача (където степента на диференциалния оператор е равна на 1) в $d+1$ -мерно пространство. В [10,12] е предложен принципно нов алтернативен метод, основаващ се на най-добра равномерна рационална апроксимация (Best Uniform Rational Approximation – BURA) на скаларна функцията в интервала $[0,1]$. По-късно беше показано, че останалите известни до момента числени методи за този клас задачи могат да бъдат представени, като рационална апроксимация на $A^{-\alpha}$, като така е доказано че BURA ги превъзхожда. Доказана е експоненциална скорост на сходимост на BURA относно степента на рационална апроксимация. Важно е, че получените в [8,10] оценки не зависят от числото на обусловеност на матрицата A . Изследвана е матричната реализация на метода, като е доказано, че BURA алгоритмите имат оптимална изчислителна сложност. В статии [11,13] е направен сравнителен анализ на паралелната скалируемост, който отново показва съществени предимства на BURA методите.

В [7] е представен систематичен обзор на числените методи за решаване на дробно-дифузионни задачи, като е показана водещата роля на BURA методите.

В най-новата статия [1] са анализирани обобщения на методите за BURA апроксимация на степени на симетрични и положително определени разреждени матрици при най-общи предположения за степента. Получените резултати имат определящо значение за развитие на теорията в тази област на изчислителната математика. Един принципно нов резултат е, че умножаването на вектор с матрица от вида $A^{-\alpha}$ ($\alpha > 0$) е числено по-трудна задача от решаване на система със същата матрица. Това поставя в качествено нова рамка прехода от елиптични към параболични задачи.

Работи [4,5] са посветени на конструиране на нови ефективни преобусловители за силно свързани многомащабни и многофизични уравнения и системи. В основата на тези резултати е фактът, че операторът на Поанкаре-Стеклов за

следата върху многообразие γ с размерност $d-1$ е спектрално еквивалентен на оператора на Лаплас-Бертрани върху γ на степен $\frac{1}{2}$.

Възприета в литературата мярка за оценка на изчислителната сложност на методи използващи рационална апроксимация е степента на рационалната функция. В [6] е предложен подход за редуциране на броя на решаваните спомагателни системи, като по този начин е подобрена оценката за сложността.

Ще отбележим също така по-ранната статия [15], която е посветена на сегментация на двуфазни вокселни изображения. Допълнителната трудност на оптимизационната задача е свързана с изискването за запазване на обема (броя на вокселите) на фазите. Предложеният метод включва решаване на система с матрица от вида $\mathbf{A}^{1/2}$, където \mathbf{A} е граф-Лапласиан със специални свойства.

Изчислителната ефективност на разработените методи за задачи с дробна дифузия се основава на използване на оптимални итерационни метод за системи с разреждени, симетрични и положително определени матрици от типа разгледани в Раздели 1.2 и 1.3.

Представените в този раздел резултати са сравнително нови. Независимо от това те вече са цитирани над 200 пъти от учени на най-високо световно ниво.

1.6. Паралелни методи и алгоритми

В статии [32,46,52,55,59] са представени методи и алгоритми, за които е изследвана паралелната ефективност и са проведени числени експерименти върху различни класове паралелни компютърни архитектури. Изходните задачи са силно свързани, което означава, че за ефективна паралелна реализация са необходими специално разработени методи и алгоритми. Теоретичните резултати включват асимптотични оценки на ускорението и ефективността. За програмната реализация са използвани библиотеки за паралелно програмиране MPI и Open MP. Получени са резултати върху паралелни системи с разпределена и обща памет. В по-ранния период от работата в тази област, съществена част от експериментите са провеждани в рамките на партньорство с водещи центрове в Европа и САЩ. През последните близо 20 години активно са използвани и българските суперкомпютри. От 2015 г. в ИИКТ-БАН работи суперкомпютър Авитохол, където през октомври 2023 г. беше открит и новия петаскейл суперкомпютър Хемус.

Така например, в [59] е изследвана паралелната реализация на блочно-циркулантни методи за тримерни задачи. В основата на този клас алгоритми е прилагането на право и обратно преобразование на Фурие. В резултат се получава факторизирано представяне с блочна структура, и по този начин се намаляват комуникациите. Принципно различен подход е приложен в [46,52,55]. За оригиналната матрица на коравина се построява локално модифицирана апроксимация, която има структура, даваща възможност за ефективна паралелна непълна факторизация от тип MIC(0). Доказано е, че спомагателната матрица удовлетворява условията за устойчива MIC(0) факторизация. Значението на този тип резултати за развитието на паралелни числени методи за решаване на частни диференциални уравнения се определя от: а) избягване на необходимостта от вложен итерационен процес, което е типично за методите, използващи разделяне на областта на подобласти; б) възможност за естествено обобщение в тримерния случай. Изследванията са насочени към

балансиране на паралелните изчисления и комуникации, както и балансиране на локалните и глобални комуникации [32]. Получени са резултати с висока ефективност при много общи предположения, включващи неструктурирани тетраедрални мрежи с локално съгъстяване. Специален фокус на тези изследвания през последните години са елиптични уравненията с дробна степен на дифузия [7,8,9,10,11,12,13,15]. Тези нелокални задачи имат изчислителна сложност, която по естествен начин води до необходимостта от суперкомпютърна производителност. В частност, това е без алтернатива при тримерни задачи по пространството в изчислителна област със сложна геометрия. Създадени са нови алгоритми с оптимална паралелна ефективност.

1.7. Математическо моделиране

В работи [2,3,14,16,17,20,21,25,26,28,31,33,37,39,42,60] са представени резултати, в които са разработени специализирани числени методи и алгоритми за решаване на важни приложни задачи, които се описват с комплексни математически модели на базата на диференциални и интегрални уравнения. Така например, работа [60] е посветена на моделиране на пилотни фундаменти в нелинейни многослойни слаби земни масиви. За ефективно решаване на задачата в тримерна постановка е приложено многонивно локално съгъстяване в зоната под челото на пилота. В статия [42] е разработен интегриран компютърен модел на процесите на вакуумно-замръзвателно сушене. За възникващата силно нелинейна параболична задача е приложена неявна дискретизация по времето с адаптивни стъпки по времето и итерационен метод с MIC(0) преобуславяне. В [39] е реализиран метод за числена хомогенизация на микроструктурата на трабекуларна костна тъкан. За целта е използвана вокселна информация за геометрията на твърдата фаза. Цел на изследването е характеризация на биомеханичните свойства на костни тъкани при изразен процес на развитие на остеопороза. В статии [28,32,33,37] са изследвани процеси на радиочестотна чернодробна туморна аблация. Математическият модел се описва със свързана нелинейна нестационарна система от частни диференциални уравнения. За дискретизация по времето е използван неявен метод, като за възникващите системи от линейни уравнения е приложен алгебричен мултигрид метод. В [14,17,19] са разработени специализирани числени методи за нелинейни задачи от динамика на конструкциите. Те включват, както робастност на дискретизацията и бифуркационен анализ, така и анализ на изчислителната сложност и ефективна алгоритмична и програмна реализация. В статии [2,3] са предложени математически и компютърни модели за анализ и прогнозиране на разпространението на COVID-19. Моделът се описва от нестационарна система от обикновени диференциални уравнения. Доказани са теореми за съществуване и единственост на решението, условия за устойчивост, както и оценки на грешката. Моделът се усложнява съществено при отчитане ролята на използваните ваксини. За настройка и валидация са използвани реални данни за България.

В работи [17,19,28,32,33,37,39] се получават дискретни задачи, които достигат стотици милиони степени на свобода (неизвестни) по пространствените променливи. Решаването на такива задачи е възможно само с помощта на високопроизводителни изчислителни системи с паралелна архитектура.

Специално ще отбележим, че изследванията свързани с моделиране, симулация и оптимизиране на процеси на радиочестотна чернодробна туморна аблация са проведени в партньорство с разработчици, производители и хирурзи прилагащи такава апаратура. Получените резултати са верифицирани с лабораторни експерименти и потвърдени от предоставените клинични данни. Резултатите са документирани в отчетите по съвместни проекти финансирани от Националния иновационен фонд и Оперативна програма Конкурентоспособност. Те са използвани за оптимизация на параметрите на произвеждана в България и изнасяна в цял свят високотехнологична нискоинвазивна електрохирургична апаратура.

2. Постижения свързани с работа по научно-приложни проекти

Представените в този раздел дейности и резултати са ограничени до работата по научно-приложни проекти само през последните 5 години.

В периода 2019 г. – 2024 г. кандидатът е бил ръководител на 5 такива проекта, както следва: а) 1 договор, финансирани от външни за България източници; б) 3 договора, финансирани от български източници; в) 1 международен договор по еквивалент. В представените документи е приложен списък на ръководените договори и проекти, както и такива в които е участвал. Дадена е и информация за привлечени финансови средства по ръководените проекти.

Полученото финансиране от външни за България източници е в размер на над **12 милиона евро**.

Особено значим за този период е финансиранят с подкрепата на Европейския фонд за регионално развитие чрез Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ проект за изграждане на Център за върхови постижения по Информатика и информационни и комуникационни технологии на който кандидатът е ръководител. Консорциумът на центъра включва Института по информационни и комуникационни технологии към БАН, Института по математика и информатика към БАН, Института по механика към БАН, Националния институт по геофизика, геодезия и география към БАН, Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“, Медицинския университет – София и Университета по библиотекознание и информационни технологии. Важен резултат от съвместната работа е създаването на критична маса от учени с възможности за резултати на най-високо ниво и технологични пробиви.

На 19.10.2023 г. в зала „Марин Дринов“ на БАН пред над 140 гости е проведено заключителното събитие по проекта, на което официално е открит създаденият уникален научен инфраструктурен комплекс за дигитална трансформация и високопроизводителни пресмятания.

В качеството си на водещ учен и ръководител, кандидатът има съществен личен принос за изграждане, поддържане и развитие в БАН на най-съвременна национална електронна инфраструктура за научни изследвания. Така, след открития през 2015 г. суперкомпютър Авитохол, от есента на 2023 г. учените от БАН и университетите в страната имат достъп до новия най-модерен български суперкомпютър Хемус.

Кандидатът работи много ангажирано за разпространение на резултатите и популяризиране на постиженията на ИИКТ-БАН и Центъра за върхови постижения с презентации у нас и в чужбина пред научна, академична, бизнес и най-широка аудитория, както и в средствата за масово осведомяване. Така например, само откриването на суперкомпютър Хемус е отразено с положителни отзиви в над 120 публикации в средства за масово осведомяване.

София, юни 2024 г.