



**ПРИМІН**

**Михайло Андрійович** — доктор технічних наук, завідувач відділу сенсорних пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України

## СУЧАСНІ СЕНСОРНІ СИСТЕМИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕДИЦИНІ, БІОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЦІ. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Стенограма доповіді на засіданні  
Президії НАН України 14 квітня 2021 року

*У доповіді наведено найважливіші результати проведених в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України досліджень з теорії і практики створення інформаційно-діагностичних технологій на основі реєстрації й аналізу магнітних, оптичних та електричних сигналів. Запропоновані методи реєстрації та інформаційна технологія перетворення магнітометричної інформації є по суті універсальними і можуть використовуватися в медицині, біології, промисловості, для створення систем пошуку корисних копалин, діагностики підземних інженерних комунікацій, дослідження магнітних властивостей матеріалів тощо.*

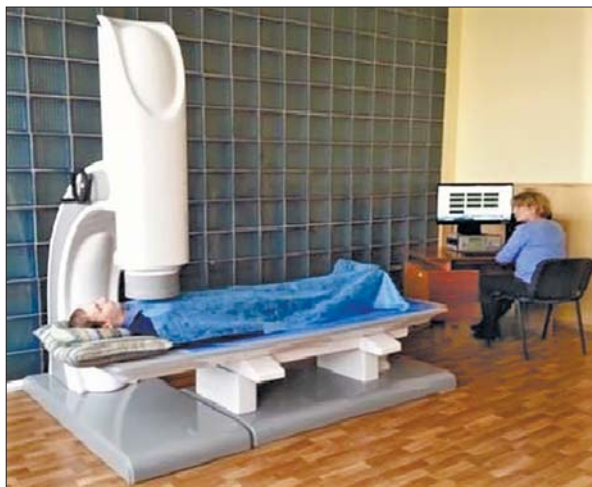
Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії! Шановні присутні!

Одним із важливих наукових напрямів досліджень Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України є розроблення інформаційно-діагностичних технологій на основі сучасних сенсорних систем, принцип дії яких ґрунтується на реєстрації та аналізі слабких магнітних, електричних та оптичних сигналів, для різних сфер застосування.

Як відомо, на початку 60-х років минулого століття експериментально було підтверджено так званий стаціонарний ефект Джозефсона, на основі якого надалі було розроблено і створено надпровідникові надчутливі SQUID-сенсорні магнітометричні системи (SQUID — Superconducting Quantum Interference Device), які мають чутливість до магнітного поля, близьку до  $10^{-15}\text{T}$  (для порівняння — магнітне поле Землі становить  $10^{-4}\text{T}$ ).

Дослідження просторово-часової структури слабких магнітних полів дає корисну інформацію для фахівців багатьох галузей науки, оскільки вимірювання в навколишньому просторі наведених струмами полів — один зі способів отримання даних про розподіл струмів у досліджуваному об'єкті і таким



**Рис. 1.** Магнітокардіографічна система для діагностики серцево-судинних захворювань

чином про стан самого об'єкта. Так, реєстрація і аналіз параметрів магнітного поля на поверхні Землі дає інформацію про підстеляючі геологічні структури або металеві предмети, зокрема інженерні комунікації, розташовані під землею. Об'єкти, що рухаються в повітряному або водному середовищі, стають електрично зарядженими внаслідок ударів по їх поверхні крапель водяної пари, часточок пилу або льоду і таким чином створюють магнітні поля, які також можна зареєструвати за допомогою SQUID-магнітометричної апаратури.

З появою високочутливих SQUID-магнітометричних систем почав зростати інтерес до досліджень просторово-часової структури слабких магнітних полів з боку фахівців різних галузей науки, однак з огляду на можливість отримувати додаткову достовірну інформацію про живі системи, реєструючи та аналізуючи їх магнітні поля, найбільш значущих практичних результатів було досягнуто при застосуванні SQUID-сенсорів для проведення саме біомагнітних досліджень.

В Україні дослідження з теорії і практики створення інформаційно-діагностичних технологій на основі реєстрації й аналізу магнітних, оптичних та електричних сигналів інтенсивно розвиваються в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. Експеримен-

тальні зразки створених в Інституті інтелектуальних сенсорних магнітометричних систем різного призначення умовно можна розділити на дві групи — «холодні», які працюють за температури рідкого гелію, і «теплі» системи, що працюють в температурних умовах навколишнього середовища. До групи «холодних» систем належать SQUID-системи для дослідження серця, мозку людини, вивчення біологічних об'єктів і зразків біоматеріалів, а також SQUID-системи для пошуку магнітних аномалій. Група «тепліх» систем охоплює такі портативні автоматизовані комплекси, як мульти-сенсорні газоаналізатори, прилади для проведення біохімічних та імунологічних аналізів і діагностики у ветеринарії, ЕКГ-комплекси, прилади для діагностики судинних хвороб людини та мікроциркуляторної ланки кровообігу.

Загалом найперспективнішою галуззю використання SQUID-магнітометричних систем на сьогодні є кардіологія. Це пов'язано з тим, що серцево-судинні захворювання є однією з головних причин смертності в усьому світі. При цьому в Україні, на жаль, рівень захворюваності і смертності від хвороб серцево-судинної системи є одним з найвищих — на них припадає більш як половина всіх смертей у країні. Для порівняння наведу такі цифри. Якщо в більшості країн Європи на 100 тис. населення щороку фіксують не більш як 300 випадків смерті від серцево-судинних патологій, то в Україні в 2018 р. — 982 випадки. До того ж у нинішніх умовах пандемії COVID-19 серцево-судинні ускладнення є одними з найпоширеніших наслідків коронавірусної хвороби.

Отже, створення нових медичних інформаційних технологій та новітньої інноваційної високотехнологічної техніки для ранньої діагностики серцево-судинних захворювань є надзвичайно актуальним завданням.

Серед нових методів діагностики серцево-судинних захворювань одним з найперспективніших для практичного впровадження є метод магнітокардіографії (МКГ). Цей метод ґрунтується на безконтактній реєстрації над грудною кліткою пацієнта за допомогою надчутливого SQUID-сенсора магнітної компо-

ненти електромагнітного поля серця з подальшим відтворенням і аналізом просторово-часових характеристик електричних джерел у міокарді, знайдених після розв'язання оберненої задачі магнітостатики, та формуванням двовимірної карти розподілу магнітного поля. Зовнішній вигляд одного з варіантів магнітокардіографічної системи наведено на рис. 1.

Кожна з відомих на сьогодні МКГ-систем має у своєму складі три функціональні модулі. Перший модуль — вимірювальний — складається зі SQUID-сенсорів, які розміщені у кріостаті з рідким гелієм, антенних систем та електронних пристроїв для зчитування сигналів. Другий, керуючий модуль містить електронні блоки та мікропроцесори для керування роботою всієї системи. Третій, програмний модуль забезпечує комп'ютерну обробку сигналів та їх відображення з використанням прикладного пакету програм з високим рівнем інтелектуального забезпечення.

Для просторової фіксації даних під час МКГ-дослідження використовують точки спостереження — вузли перетину квадратної сітки ( $6 \times 6 = 36$  вузлів). Безпосереднім результатом попередньої обробки даних є 36 магнітокардіографічних кривих у точках спостереження, які мають прив'язку до анатомічних орієнтирів грудної клітки (рис. 2).

На початковому етапі розвитку магнітокардіографії методи її аналізу копіювали методи аналізу електрокардіограм (ЕКГ). Надалі для аналізу та інтерпретації МКГ-даних стали використовувати методи, тісно пов'язані зі створенням сучасних інтелектуальних технологій.

Магнітний сигнал реєструють з частотою 1 кГц, тому крива сигналу складається з окремих «шматочків», що відповідають певним «моментам» часу. На основі 36 синхронних усереднених МКГ-кривих за допомогою алгоритмів двовимірної інтерполяції будують «миттеві» (у рамках 1 мілісекунди) карти розподілу магнітного поля. Далі за допомогою алгоритмів розв'язання «оберненої задачі» еквііндукційні карти розподілу магнітного поля можуть бути перетворені на відповідні миттеві карти розподілу векторів густини стру-

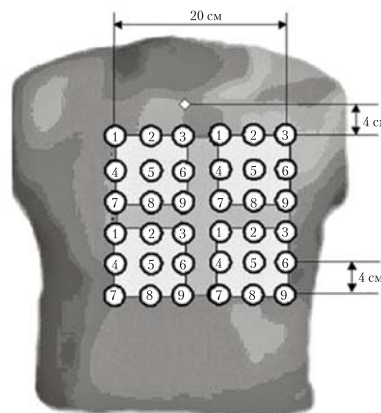


Рис. 2. Схема магнітокардіографічних вимірювань

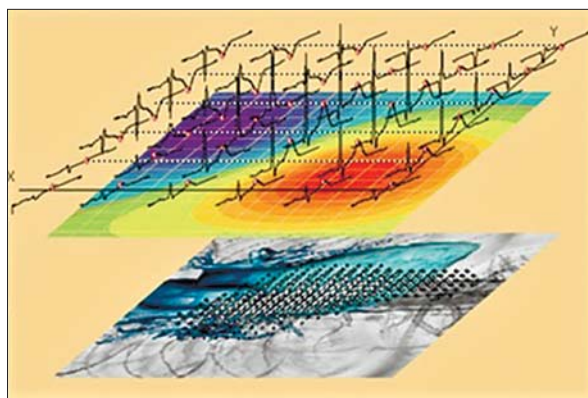
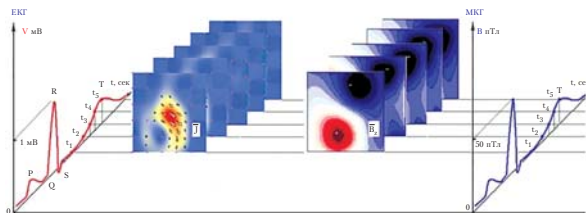


Рис. 3. 2D-карта розподілу Z-компоненти магнітного поля в заданий момент часу кардіоциклу

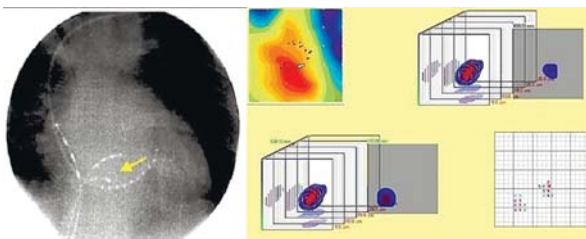
мів (ВГС) (рис. 3). Принциповою новизною запропонованого аналізу МКГ-даних є можливість оцінки динаміки змін густини струму протягом кардіоциклу за допомогою карт, послідовно розташованих у часі, — так зване динамічне картування (рис. 4).

Отже, миттеві карти вектора густини струмів та набори таких карт протягом інтервалів кардіоциклу є основним діагностичним зображенням та об'єктом аналізу в магнітокардіографії.

Послідовність аналізу просторово-часових розподілень вектора густини струмів можна представити у вигляді числової інформації (так званих метрик) і застосовувати надалі для отримання автоматичного висновку.



**Рис. 4.** Спільне та відмінне між ЕКГ і МКГ. Послідовність карт розподілу вектора густини струмів і миттєвих карт магнітного поля серця



**Рис. 5.** Приклади відображення і аналізу даних вимірювань магнітокардіограми (локалізація фокусної патології і вигляд поширеної патології при ішемічній хворобі серця)

Головна відмінність МКГ від ЕКГ полягає в тому, що провідний об'єм тіла людини з високою точністю «прозорий» для магнітного поля серця і практично не впливає на величину сигналу, що реєструють магнітометричною системою. Тому при вимірюванні МКГ ми отримуємо інформацію безпосередньо про токи в серці, а при реєстрації ЕКГ — про токи, які протікають у тілі людини і опосередковано в серці (рис. 4). Магнітокардіографія чутлива насамперед до іонних струмів серця і дає можливість отримувати більш ранню діагностичну інформацію, ніж відомі потенційні методи.

Однак слід зауважити, що біомагнітні сигнали набагато менші за величиною, ніж завади навколишнього середовища, і на 7–8 порядків менші за магнітне поле Землі, тому проблема реєстрації та обробки слабких магнітних сигналів в умовах сильних завад промислового міста є винятково складною і потребує застосування спеціальних екранованих кімнат. Однак лише незначна частина потенційних

користувачів можуть дозволити собі спорудження такої екранованої кімнати, оскільки це досить високоартісна справа. В нашому Інституті ми використали більш наукомісткий і більш дешевий спосіб послабити вплив зовнішніх завад — розробили нові підходи до просторової селекції, фільтрації і цифрової обробки сигналу. Як результат — було створено кардіомагнітометричний комплекс, який надійно працює в звичайних (неекранованих) приміщеннях медичних клінік, що відкриває можливості для широкого його впровадження в медичну практику при обстеженні великих груп населення.

З іншого боку, реєстрація величин параметрів магнітного поля досліджуваних об'єктів — це лише одна, технічна, частина завдання. Іншою важливою частиною, як я вже згадував вище, є інтерпретація даних вимірювань, що потребує розроблення інформаційної технології (методів і алгоритмів) перетворення та аналізу даних. Для цього потрібно розв'язати так звану обернену задачу магнітостатики. Пряма задача полягає в тому, щоб за відомим розподілом джерел поля знайти значення величин магнітного поля у заданих точках простору. В оберненій задачі потрібно знайти просторовий розподіл джерел магнітного поля за відомими значеннями величин магнітного поля у заданих точках. Функціональні зв'язки між параметрами розподілу, а також типом джерел сигналу і вимірними значеннями поля вважаються невідомими, і їх також необхідно встановити.

Відомі підходи до розв'язання оберненої задачі, як правило, ґрунтуються на застосуванні ітераційних алгоритмів, де як джерело сигналу дипольної моделі беруть електричний диполь. Виявилось, що є й інший підхід: якщо як джерело сигналу прийняти модель магнітного диполя, то розв'язок задачі для дипольного джерела можна отримати аналітично за допомогою апарату власних векторів. За допомогою інтегрального перетворення Фур'є було розв'язано обернену задачу і для джерела магнітного сигналу у вигляді системи струмів, розподіленої у площині, яка паралельна площині вимірювань.



Отримані теоретичні результати було опубліковано у відповідних наукових виданнях, захищено низкою патентів, що підтверджують їх новизну, і, як буде показано далі, реалізовано на практиці в системах різного призначення.

На рис. 5 наведено приклади відображення на екрані комп'ютера результатів аналізу магнітокардіограми при дослідженні серця людини.

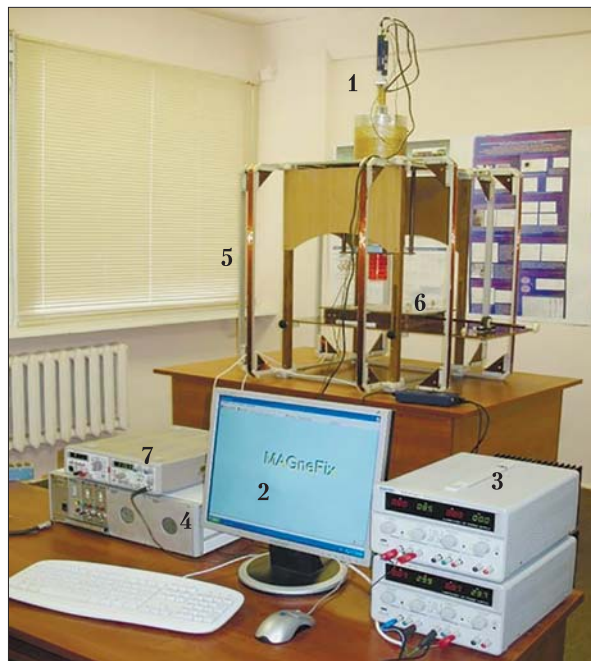
Однак головним результатом роботи інформаційно-діагностичної системи магнітокардіографа після автоматичного аналізу МКГ пацієнта є висновок для лікаря-кардіолога, який отримують із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту.

Магнітометричний комплекс та інформаційні технології, розроблені і створені в Інституті, вже кілька років використовують у Національному військово-медичному клінічному центрі «Головний військовий клінічний госпіталь» Міністерства оборони України.

Фахівці Головного військового клінічного госпіталю та Національного наукового центру «Інститут кардіології імені академіка М.Д. Стражеска» НАМН України за участю співробітників Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України розробили відповідні методичні рекомендації, схвалені головним кардіологом України і затверджені Міністерством охорони здоров'я України та Національною академією медичних наук України.

Зараз триває виконання партнерського проєкту між фірмою Oxford Cardiomox Ltd, УНТЦ та Інститутом кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, в рамках якого замовнику поставлено вже п'ять 9-канальних кардіомагнітних сканерів. У 2019–2020 рр. ця система пройшла медичну сертифікацію у Китаї (отримано сертифікат CFDA).

Зауважимо, що запропоновані математичні моделі та методи обробки даних орієнтовано на SQUID-магнітометричні системи не лише медичного призначення. Їх можна використовувати, наприклад, як інструмент для безконтактних експериментів у біології з метою дослідження дрібних тварин як фізичних моделей для імітації різних патологій або в техніці



**Рис. 6.** Біосептометр для дослідження біологічних об'єктів і магнітних властивостей зразків матеріалів: 1 – SQUID-магнітометр; 2 – персональний комп'ютер; 3 – джерело струму для створення магнітного поля; 4 – блок керування і обробки даних; 5 – система для намагнічення; 6 – система позиціювання; 7 – генератор

для вивчення магнітних властивостей зразків матеріалів, пошуку магнітних аномалій тощо.

За фінансової підтримки УНТЦ в нашому Інституті створено надчутливу SQUID-сенсорну магнітометричну систему – біосептометр (рис. 6) для дослідження біологічних об'єктів та магнітних властивостей зразків різних матеріалів. Проведено експерименти на дрібних тваринах з вивчення процесів накопичення заліза в печінці, розвитку онкологічних пухлин тощо. Так, разом зі співробітниками Інституту медицини праці ім. Ю.В. Кундієва НАМН України було виконано дослідження щодо впливу токсичних матеріалів на живі системи за допомогою реєстрації і аналізу магнітних сигналів від органів тварин після введення їм наночастинок кадмію, свинцю, ацетату свинцю залежно від доз, експозиції, розмірів, способу введення в організм. А у спільних



**Рис. 7.** Автоматизований ЕКГ-комплекс на 12 відведень



**Рис. 8.** Мультисенсорний газоаналізатор на  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  для діагностики стану здоров'я людини за складом повітря, яке вона видихає

роботах з Інститутом експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України підтверджено можливість здійснення контролю за доставкою протипухлинних ліків у певні органи тварин за допомогою спеціальних магнітних наноконструктив. Крім того, разом зі співробітниками Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України ми виконали дослідження магнітних властивостей зразків вугільної речовини з метою визначення умов активації структурних перетворень у вуглецевих структурах.

Останніми роками сенсорні SQUID-системи почали активно використовувати для магнітної зйомки при пошуку корисних копалин, а також для вирішення завдань з виявлення підземних інженерних комунікацій, наприклад трубопроводів. В Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України цей напрям також розвивається. На основі запропонованого нами підходу до розв'язання оберненої задачі ми розробили і створили сенсорну SQUID-магнітометричну систему для пошуку інженерних комунікацій під землею. Вимірвальний модуль цієї системи має один вимірвальний канал замість шести, як у відомих аналогів. Експериментальну перевірку системи було проведено в січні 2017 р. на спеціальному тестовому полігоні в Пекіні (КНР).

Слід зазначити, що теоретична частина інформаційної технології, використаної для створення SQUID-магнітометричної системи пошуку інженерних комунікацій, по суті, така сама, як і для магнітокардіографічної SQUID-системи. Різняться вони лише деякими конструктивними особливостями, такими як параметри антен, розміри сітки вимірювань тощо, та відповідним програмним забезпеченням.

Починаючи з 2013 р. наш Інститут бере участь у виконанні комплексної науково-технічної програми НАН України, перший етап якої мав назву «Сенсорні прилади для медико-екологічних та промислово-технологічних потреб: метрологічне забезпечення та дослідна експлуатація». У рамках виконання проєктів за цією програмою на «теплі» сенсорні системи було отримано понад 20 свідоцтв про державну атестацію, більш як 30 патентів, опубліковано десятки статей, проведено дослідну експлуатацію розроблених сенсорних приладів та спільні дослідження в 15 організаціях різного підпорядкування.

Серед наших розробок — мобільні електрокардіографічні комплекси (рис. 7), які складаються з портативного електрокардіографа (на 6 і 12 відведень) та програмного забезпечення, яке дозволяє виконати більш глибокий і детальний аналіз, ніж звичайні ЕКГ. З викорис-

танням цих комплексів проведено масштабні кардіоскринінгові дослідження населення в Хмельницькій (понад 22 тис. ЕКГ) та Луганській (2,5 тис. ЕКГ) областях. Аналіз цього великого масиву даних дозволив виявити зв'язок між інтегральними показниками електрокардіограм та соціально-економічними показниками окремих районів Хмельницької області. Розроблений нами метод шкалювання ЕКГ застосовано і при аналізі великого масиву електрокардіографічних даних у рамках дослідження Інституту популяційного здоров'я Університету Оксфорда.

Виготовлено експериментальні зразки сенсорних приладів, принцип дії яких оснований на реєстрації оптичних сигналів. Це фотоплетизмографи «Пульсодін» для діагностики судинних захворювань людини, які розвиваються під впливом різних негативних факторів, таких як стреси, травми, у тому числі й бойові поранення у військових, і «Гемодін» для діагностики мікроциркуляторної ланки кровообігу, а також перспективний портативний неінвазивний гемоглобінометр для визначення гемоглобіну в біотканинах людини.

Розроблено також експериментальні зразки біохімічних і газоаналітичних приладів, наприклад мультисенсорний газоаналізатор  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  (рис. 8) для діагностики стану здоров'я за складом повітря, яке видихає людина.

Створено портативні прилади, принцип роботи яких оснований на явищі поверхневого плазмонного резонансу, для біохімічних досліджень та контролю якості продуктів. Зокрема, прилад «Плазмонтест», призначений для проведення біохімічних та імунологічних аналізів, який проходить досліду експлуатацію в Національному університеті біоресурсів і природокористування.

І на завершення дуже коротко зупинюся на перспективах розвитку SQUID-сенсорних магнітометричних систем. Для «холодних» систем визначальним фактором може стати застосування портативних рефрижераторів для скраплення гелію, яке вирішує проблему «ресурсу» роботи магнітометричної системи і зменшує вартість її обслуговування, але водночас породжує низку супутніх проблем, таких як витрати на додаткове обладнання, необхідність усунення магнітних і механічних завад тощо.

Що стосується розвитку «тепліх» інтелектуальних сенсорних систем, то тут головна проблема полягає в тому, що тиражування і впровадження розробок потребує додаткових людських і фінансових ресурсів для проведення дослідної експлуатації та сертифікації приладів і методів.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик*

*Mykhailo A. Primin*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-4208>

Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MODERN SENSOR SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES  
IN MEDICINE, BIOLOGY AND TECHNOLOGY. DEVELOPMENT PROSPECTS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, April, 14, 2021

The report presents the most important results of the Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine research on the theory and practice of creating information and diagnostic technologies based on the registration and analysis of magnetic, optical and electrical signals. The proposed methods of registration and information technology for the conversion of magnetometric information are essentially universal and can be used in medicine, biology, industry, to create systems for searching for minerals, diagnostics of underground utilities, research of magnetic properties of materials and more.

**Keywords:** SQUID-sensors, intelligent sensor systems, magnetometric systems, magnetocardiography, inverse problem of magnetostatics.