

2 апреля 1993 г. в Новосибирске была зарегистрирована новая организация – Международный томографический центр. Из архива МТЦ СО РАН



Академик Р. З. Сагдеев:
«Название мы придумали сразу —

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР»



В 2023 г. Международный томографический центр (МТЦ) СО РАН отмечает свой 30-летний юбилей: 2 апреля 1993 г. было официально объявлено о создании на базе уже имеющегося научно-исследовательского комплекса новой добровольной неправительственной организации – так называемого открытого института. Однако этой дате в Сибирском отделении предшествовало более чем полтора десятилетия исследований в области спектроскопии магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии (МРТ). Да и само формирование научно-исследовательского учреждения нового типа, совмещающего в себе функции научного коллектива, международной лаборатории и медицинского диагностического центра, заняло немало лет и потребовало огромных усилий и вложений

Ключевые слова: магнитный ядерный резонанс, электронный парамагнитный резонанс, магнитная радиоскопия, Международный томографический центр, МТЦ СО РАН, ЯМР-томография, В. В. Воеводский, Ю. Н. Молин, Р. З. Сагдеев.

Keywords: magnetic nuclear resonance, electron paramagnetic resonance, magnetic radioscopy, International Tomography Center, ITC SB RAS, NMR tomography, V. V. Voevodsky, Yu. N. Molin, R. Z. Sagdeev

В уставе Международного томографического центра, утвержденном в 1993 г., были сформулированы три основных направления деятельности: развитие фундаментальных и прикладных научных исследований в области ЯМР-томографии и смежных областях; диагностическое обследование населения; коммерческая деятельность в рамках основных направлений деятельности внутри страны и за рубежом.

У истоков

Как известно, явление *ядерного магнитного резонанса* (ЯМР) открыли в середине 1940-х гг. независимо друг от друга швейцарский физик Ф. Блох и американский ученый Э. Перселл. Еще в середине 1970-х гг. спектроскопия ЯМР была относительно новым методом в ряду других спектроскопических методов изучения структуры вещества, однако затем в очень короткий срок вышла в лидеры во многих областях, заменив традиционные. Ее преимуществами были не только высокая информативность, но и «неинвазивность» самого процесса исследования, обеспечивавшая сохранение структуры вещества и целого объекта. Все это открывало перед экспериментаторами невиданные ранее возможности, в первую очередь в биологии и медицине.

В Сибирском отделении АН СССР, образованном в 1957 г., развитие методов *радиоспектроскопии* было тесно связано с новосибирским Институтом химической кинетики и горения (ИХКиГ), организованном по инициативе академика Н.Н. Семенова, нобелевского лауреата по химии. Кадровую основу нового института составили сотрудники московского Института химической физики АН СССР, среди которых был блестящий ученый, будущий академик В.В. Воеводский. Основанная им научная школа стала основным проводником идей химической физики и драйвером исследований в этой области в СО АН СССР.

Научные интересы Воеводского были чрезвычайно разнообразны, а одной из его заслуг стало творческое применение различных физических методов для изучения механизма химических процессов. Еще работая в Москве, он поддерживал исследования по применению для исследовательских целей *электронного парамагнитного резонанса* (ЭПР). А в конце 1950-х гг. в лаборатории механизмов цепных и радикальных реакций, руководимой Воеводским, была создана первая в мире установка по измерению спектров ЭПР специально для химических исследований.

Учениками и коллегами Воеводского были будущие академики Ю.Н. Молин, Ю.Д. Цветков, Р.З. Сагдеев и К.М. Салихов. Воеводский «заразил» своих сотрудников идеями *слабого взаимодействия* в химических реакциях, достаточно туманными вначале.

Р.З. САГДЕЕВ:

«Я перевелся в Новосибирск из Казанского университета в 1963 г. ... Когда учился уже на последнем курсе [НГУ], услышал, что создается новая, на стыке наук, кафедра химической физики. А возглавил кафедру тогда еще член-корреспондент Воеводский. ... Всего полтора года был знаком с ВВ – так его называли все. Но полтора незабываемых года... Воеводский производил неизгладимое впечатление» (Цит. по: Нотман, 2007, с. 118).

«... традиции Воеводского собирать сотрудников института: как аспирантов и студентов, так и ведущих ученых на “большие сидения”. В течение нескольких дней мы обсуждали текущее состояние науки и фантазировали. При этом все участники этих сидений должны были высказываться честно и откровенно, как любил говорить Воеводский – “по гамбургскому счету”. Кстати именно на этих сидениях был сформирован вектор нашей работы, выбрано направление в исследованиях» (Цит. по: «Магнетизм академика Сагдеева», 2011, с. 22–23)

В то время влияние *спина* электрона и даже ядра на химическую реакцию не учитывалось из-за того, что энергия взаимодействия молекул с магнитным полем очень мала. Для изучения слабых взаимодействий в реакциях с участием свободных радикалов группой Молина «были отработаны и реализованы оригинальные подходы к изучению распределения спиновой плотности по контактным сдвигам в спектрах ЯМР» (Молин, 2004). Дальнейшие ЯМР-исследования привели к открытию влияния магнитных полей на радикальные химические реакции, что изменило фундаментальные основы современной химии.

Так при активном участии новосибирских ученых возникло новое научное направление химии – *спиновая химия*. Впоследствии эстафету исследований в этой ставшей традиционной области химии приняла научная школа *спектроскопии ядерного магнитного резонанса сложных парамагнитных систем* академика Р.З. Сагдеева, организатора и будущего директора Международного томографического центра.

От идеи до института

В СССР в начале 1980-х гг. материальное обеспечение гражданской науки значительно ухудшилось: финансирование в большей степени шло «по остаточному принципу». Не хватало молодых научных кадров, современного оборудования, что отражалось на уровне научных исследований.

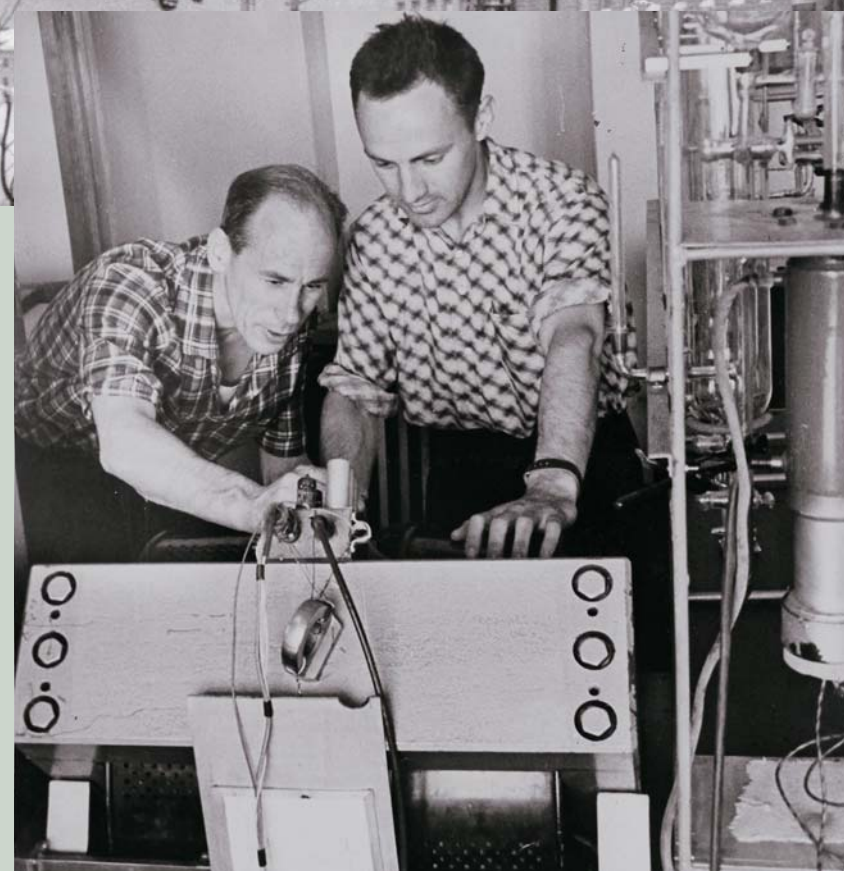
В марте 1980 г. председателем СО АН СССР был назначен академик В.А. Коптюг, и одной из его

плодотворных идей стало создание на базе ведущих сибирских институтов международных научных центров (МНЦ).

Выступая на заседании Научного комитета НАТО в Брюсселе 30 сентября 1993 г., он дал краткую оценку долгосрочного сотрудничества в приоритетных областях фундаментальных и прикладных исследований: «Мы организовали 15 таких центров, и некоторые из них уже успешно действуют как “открытые” международные лаборатории, где ученые разных стран могут работать вместе с российскими учеными, используя уникальные возможности ряда институтов СО РАН. Мы считаем, что эти центры можно

рассматривать как элементы распределенной инфраструктуры, способствующей интеграции мировой науки» (Коптюг, 2007, с. 336–343).

Одним из таких центров стал Международный томографический центр. Замысел «предприятия» возник в середине 1980-х гг.,



Институт химической кинетики и горения (ИХКиГ) АН СССР был организован в 1957 г. Первоначально его лаборатории территориально располагались в Москве, но к 1961 г. все они переехали в новосибирский Академгородок в новое здание института. 1961 г. Фото из архива ИХКГ СО РАН

Академик В.В. Воеводский и канд. хим. наук Ю.Н. Молин в лаборатории механизма цепных и радикальных реакций. ИХКиГ АН СССР, начало 1960-х. Фото из архива Ю.Н. Молина



В. А. Коптюг с учениками В. В. Воеводского: Ю. Н. Молиным (директором ИХКГ СО РАН в 1971–1993 гг.) и К. И. Замараевым (директором Института катализа СО РАН в 1984–1995 гг.). Фото из архива ИХКГ СО РАН

и этому во многом способствовали широкие международные научные связи ИХКиГ. Зарубежные ученые проходили стажировку в лабораториях института, сотрудники которого, в свою очередь, активно участвовали в организации и работе международных научных мероприятий, выставках научно-технических разработок и т.п. При этом география международного сотрудничества с ведущими зарубежными лабораториями охватывала страны не только бывшего социалистического лагеря, но и Западной Европы, а также Великобританию, США и Японию.

В 1980-х гг. развитие и практическое применение метода МР-томографии на Западе шло полным ходом. Приборы ЯМР постоянно совершенствовались,

лавинообразно нарастал поток исследований, возникали новые и расширялись традиционные области приложения этого метода в физике, химии, биологии и медицине. Благодаря широкому применению мини- и микроЭВМ эффективность чувствительность спектрометров увеличилась в сотни и тысячи раз.

Часто бывая на международных конференциях, заведующий лабораторией магнитных явлений ИХКГ Р.З. Сагдеев заметил, что «томография собирает большую аудиторию: большие секции посвящают томографии, по 25–30 выступающих каждый день, а наших докладчиков практически не было, в СССР к таким исследованиям фактически еще не приступали» (Цит. по: Институт, который построил Сагдеев, 2004, с. 6).

В марте 1988 г. было заключено соглашение между СО АН СССР и фирмой «Брукер» (*Bruker*, ФРГ) об организации Международного научно-методического центра по ЯМР-томографии при ИХКиГ, с финансированием отдельной строкой. Приборы центра предполагалось разместить в надстройке энерготехблока корпуса института.

В новом центре продолжилась работа по развитию фундаментальных аспектов ЯМР-томографии и ее медицинских приложений. В сферу его деятельности также были включены задачи диагностического обследования населения и содействия в создании сети медицинских центров томографии в стране и за рубежом.

На первом этапе использовать томографическое оборудование для фундаментальных исследований и медицинской диагностики планировалось на паритетных началах, однако потребности медиков были настолько велики, что очень скоро томограф почти полностью оказался в их распоряжении – на фундаментальные исследования оставались лишь два выходных дня в неделю. Чтобы решить проблемы, центру требовалось существенно расширить приборный парк и площади, получить административную,

Чл.-корр. АН СССР Р. З. Сагдеев (справа) с профессором Г. Лаукиным (слева), одним из основателей западногерманской компании *Bruker* – мирового лидера в производстве приборов для спектрального анализа. Спустя десять лет после образования в 1960 г. компания открыла свое представительство в России. Фото из архива ИХКГ СО РАН

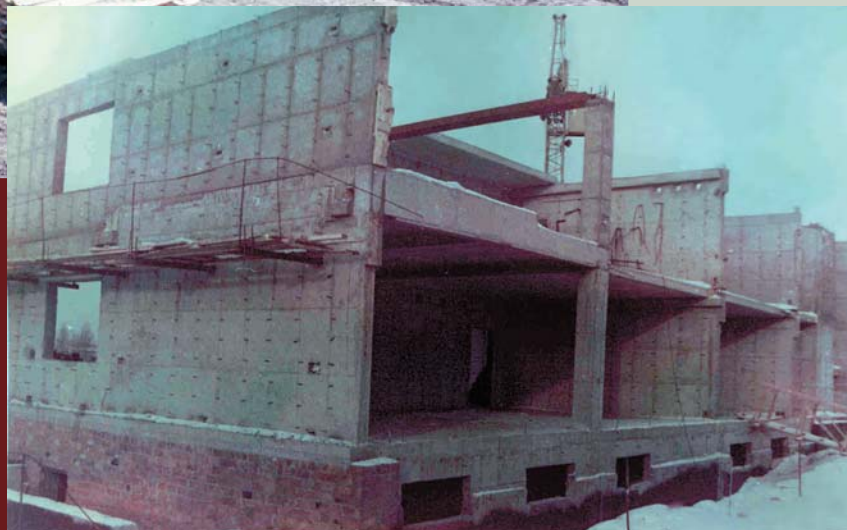


Р.З. САГДЕЕВ:

«В 1980-е гг. я принимал участие в международной конференции по магнитному резонансу. В то время на Западе активно развивалась магнитно-резонансная томография (МРТ). Конечно, я понимал, что это особая техника, дорогая, непростая, но очень хотелось начать подобные исследования и у нас. Я познакомился с профессором Гюнтером Лаукиным [Laukien], известным немецким физиком, ведущим специалистом в области ядерной магнитной спектроскопии, – впоследствии его избрали иностранным членом АН СССР. Еще в 1960 г. Лаукин учредил фирму “Брукер”, которая стала производить ЯМР-спектрометры, а затем и томографы. Мне удалось его уговорить поставить нам первый томограф в рассрочку. В Институте химической кинетики и горения, где я тогда работал, мы создали отдел магнитно-резонансной томографии. Однако вскоре стало ясно, что нужно создавать отдельный институт. Название мы придумали сразу – Международный томографический центр. Но вот с его организацией оказалось сложнее» (Сагдеев, Иванов, 2020, с. 8)



Строительство здания Международного томографического центра, начатое в 1990 г., продолжалось около двух лет.
Фото из архива МТЦ СО РАН



финансовую и юридическую самостоятельность.

Времена были тяжелые, безденежные... Однако к лету 1989 г. была достигнута договоренность, что Сибирское отделение, фирма *Bruker* и кооперативный банк «Восток» создадут совместное предприятие и за счет собственных валютных средств профинансируют строительство и комплектацию нового здания МТЦ.

Академик Г.И. Марчук, тогдашний президент Академии наук СССР, поддержал Р.З. Сагдеева: ИХКиГ для фундаментальных исследований по ЯМР-томографии было предоставлено 2 млн руб. на развитие и укрепление материально-технической базы. А фирма *Bruker* внесла вклад в размере 500 тыс. немецких марок

Р.З. САГДЕЕВ:

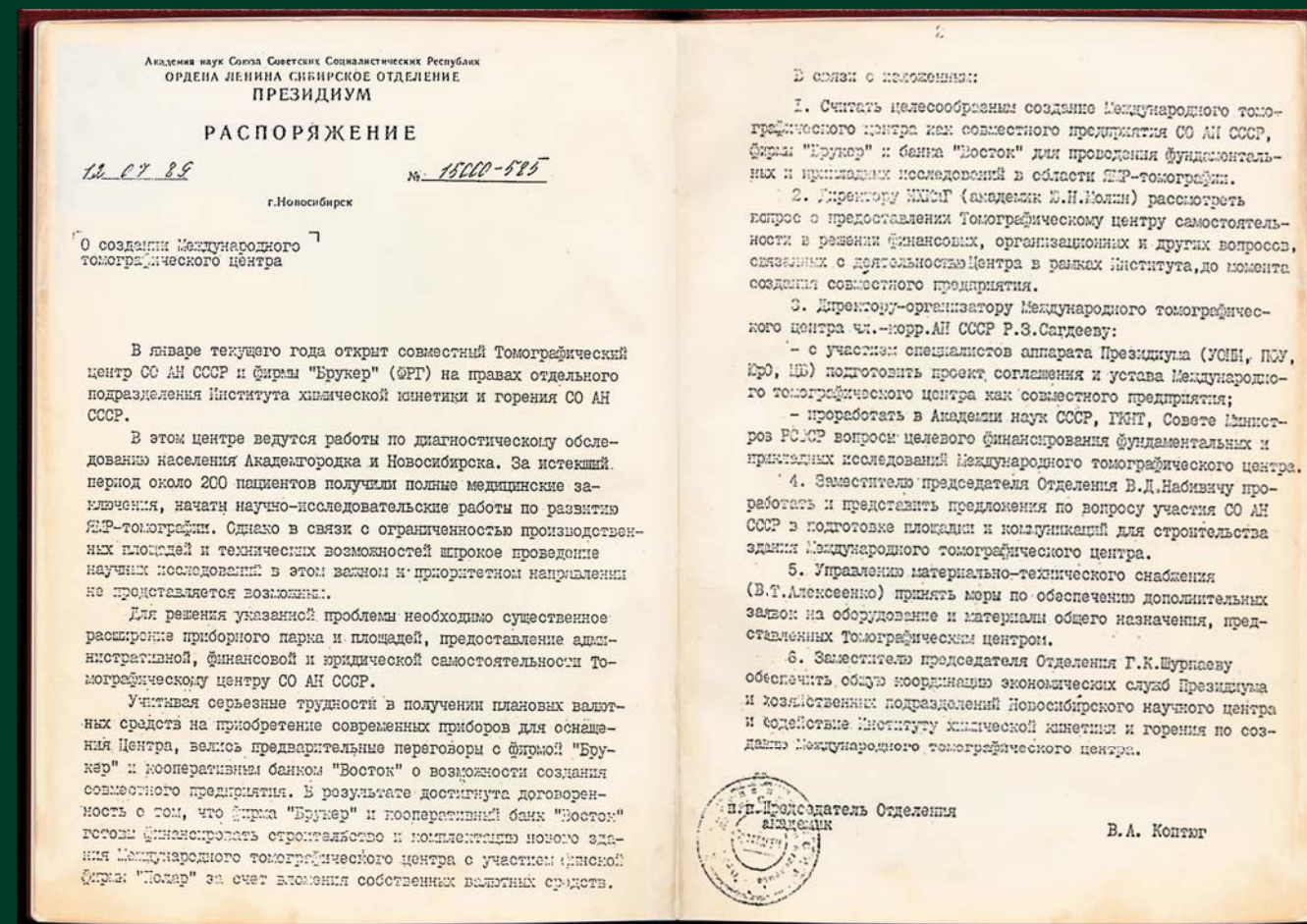
«Когда пошел нескончаемый поток больных, стало ясно, что диагностика – это приоритет номер один. Тогда-то и вспомнилась идея создания того самого независимого института, который бы занимался фундаментальной наукой и сам бы зарабатывал.

... Я ушел из института, создал дирекцию строящегося объекта, возглавив ее. Моим рабочим кабинетом стал вагончик, который находился на территории стройки... Затем мы создали коммерческий отдел при дирекции, занимались самыми разными сделками, чтобы заработать денег. Продавали семечки в Грецию, обратно масло вывозили... Строительство продолжалось около двух лет, часть сотрудников из моей бывшей лаборатории я зачислил на полставки в еще не готовый Центр, время ведь было очень тяжелое для науки, а я понимал, что это будущий костяк.

Случались, конечно, моменты отчаяния, когда не было денег, нечем было платить зарплату, хотелось все бросить. Но я понимал, что процесс нельзя останавливать, ибо тогда он заглухнет навсегда. В каком-то смысле я благодарен тому времени, потому что стройка – это самая настоящая жизненная школа.»

(Цит. по: Жизненная школа академика Сагдеева, Наука в Сибири, 2010)

Постановление Президиума СО РАН об организации при Сибирском отделении Международного томографического центра. 1989 г.
Фото из архива МТЦ СО РАН



Академия наук Союза Советских Социалистических Республик
ОРДЕНА ЛЕНИНА СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ПРЕЗИДИУМ

РАСПОРЯЖЕНИЕ

18.07.89 № 18000-585
г. Новосибирск

О создании Международного томографического центра

В январе текущего года открыт совместный Томографический центр СО АН СССР и фирмы "Брукер" (ФРГ) на правах отдельного подразделения Института химической кинетики и горения СО АН СССР.

В этом центре ведутся работы по диагностическому обследованию населения Академгородка и Новосибирска. За истекший период около 200 пациентов получили полные медицинские заключения, начаты научно-исследовательские работы по развитию ЯМР-томографии. Однако в связи с ограниченностью производственных площадей и технических возможностей широкое проведение научных исследований в этом важном и приоритетном направлении не представляется возможным.

Для решения указанной проблемы необходимо существенное расширение приборного парка и площадей, предоставление административной, финансовой и юридической самостоятельности Томографическому центру СО АН СССР.

Учитывая серьезные трудности в получении плановых валютных средств на приобретение современных приборов для оснащения Центра, велись предварительные переговоры с фирмой "Брукер" и кооперативным банком "Восток" о возможности создания совместного предприятия. В результате достигнута договоренность о том, что фирма "Брукер" и кооперативный банк "Восток" готовы профинансировать строительство и комплектацию нового здания Международного томографического центра с участием (фирмы "Толар" за счет вложения собственных валютных средств.

В связи с изложенным:

1. Считать целесообразным создание Международного томографического центра как совместного предприятия СО АН СССР, фирмы "Брукер" и банка "Восток" для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области ЯМР-томографии.
2. Директору ИХКиГ (академик Е.И.Молин) рассмотреть вопрос о предоставлении Томографическому центру самостоятельности в решении финансовых, организационных и других вопросов, связанных с деятельностью Центра в рамках Института, до момента создания совместного предприятия.
3. Директору-организатору Международного томографического центра чл.-корр. АН СССР Р.З.Сагдееву:
- с участием специалистов аппарата Президиума (УОНИ, ПОУ, ИРФ, ИФ) подготовить проект соглашения и устава Международного томографического центра как совместного предприятия;
- проработать в Академии наук СССР, ЦКНТ, Совете Министров РСФСР вопрос целевого финансирования фундаментальных и прикладных исследований Международного томографического центра.
4. Заместителю председателя Отделения В.Д.Набишу проработать и представить предложения по вопросу участия СО АН СССР в подготовке площадки и коммуникаций для строительства здания Международного томографического центра.
5. Управлению материально-технического снабжения (В.Т.Алексеевко) принять меры по обеспечению дополнительных затрат на оборудование и материалы общего назначения, представленных Томографическим центром.
6. Заместителю председателя Отделения Г.К.Шурпаеву обеспечить общую координацию экономических служб Президиума и хозяйственных подразделений Новосибирского научного центра и содействие Институту химической кинетики и горения по созданию Международного томографического центра.

В.П. Председатель Отделения
академик

В.А. Коптыг



Р.З. САГДЕЕВ:

«Первые пять лет мы работали без бюджета. У меня не было цели создать коммерческий проект, я просто хотел, чтобы было на что содержать науку. Но тяжкое бремя налогов подкашивало Центр, поэтому было принято решение передать его Сибирскому отделению РАН.

Оказалось, что это еще более сложный вопрос, чем строительство. Как нам сказали юристы, предварительно нужно уволить всех сотрудников и год осуществлять аудит Центра. Конечно, это было невозможно. Я поехал к начальнику городской регистрационной палаты, образно описал ситуацию. Затем провел для нее экскурсию по Центру, в конце которой она сказала, что мы занимаемся важной работой, и сразу же перевела нас в статус бюджетной организации. И невозможное – возможно, если очень захотеть!»

(Цит. по: Жизненная школа академика Сагдеева, Наука в Сибири, 15 апреля, 2010)

По окончании строительных работ Дирекция строительства объекта была упразднена в 1993 г., а Международный томографический центр приобрел статус некоммерческого партнерства – такие некоммерческие организации в российской правовой системе появились лишь в августе 1992 г. Из архива МТЦ СО РАН



Торжественное открытие Международного томографического центра состоялось 13 сентября 1993 г. Красную ленточку перерезал сын одного из основателей центра, немецкого профессора Гюнтера Лаукина. Фото из архива МТЦ СО РАН

в строительство нового современного здания, под которое был выделен необустроенный пустырь за институтом.

Подрядчиком строительства выступила финская фирма *Polar*, которая согласилась сделать проект, рабочую документацию и наружные стены, а польская фирма *Budimex* предоставила в аренду скользящую опалубку для монолитного литья бетона, которое было новостью для Новосибирска.

Для того чтобы обеспечить ввод центра в эксплуатацию в 1991 г., в январе 1990 г. при заказчике была создана Дирекция по строительству объекта, которую возглавил Сагдеев.

К концу 1990 г. в МТЦ официально перешли все сотрудники Томографического центра при ИХКиГ, а в 1991 г. СО РАН выделило средства на капитальное строительство здания в размере 3 млн руб., официально закрепив за центром землю с учетом полного завершения строительных работ.

На время строительства работа центра не прерывалась. Был разработан ряд принципиально новых методов томографии, с помощью которых стало

возможным измерять потоки крови и цереброспинальной жидкости в организме, что оказалось исключительно важным для кардиологии, онкологии и неврологии. А метод получения изображений сердца на любой фазе сердечного цикла позволил определять морфологию и функциональное состояние сердечной мышцы. В центре проводились и исследования по получению оптимального контраста ЯМР-изображений на основе измерения релаксационных параметров тканей, благодаря чему появилась возможность оценивать структурные изменения внутренних органов и диагностировать рак на ранних стадиях.

Нужно сказать, что период становления центра пришелся на кризисные годы: не хватало финансирования, строительных материалов и оборудования, да и просто рабочих рук. В сентябре 1991 г. группа компаний *Bruker Spektrospin* согласилась с предложением Сибирского отделения войти в состав Совета учредителей МТЦ, доведя свой уставной капитал до 50% путем внесения денежных средств или материалов и оборудования. К тому моменту взнос в уставной капитал от фирмы *Bruker* уже составлял 1 млн 260 тыс. немецких марок.

В наши дни Международный томографический центр СО РАН – это мощный, оснащенный современным оборудованием исследовательский институт. Помимо фундаментальных исследований, здесь ведутся прикладные, экспериментальные и теоретические работы по развитию и оптимизации методик МРТ. 2023 г. Фото из архива МТЦ СО РАН



Творческому настрою и хорошей работоспособности сотрудников МТЦ СО РАН сегодня помогает и внутреннее оформление здания института витражами и картинами, и ухоженная территория, радующая глаз обилием деревьев и цветов, а также собственный оздоровительный центр в цокольном этаже, где есть тренажерный зал, сауна, бассейн и солярий.

Фото из архива МТЦ СО РАН



Этот шаг оказался решающим для дальнейшего успешного развития центра и его приборной базы, весьма дорогостоящей. В частности, в 2005 г. представители концерна *Philips* (Нидерланды) установили и сдали в эксплуатацию в МТЦ высокопольный томограф *Achieva Nova Dual* с индукцией магнитного поля 1,5 Тл.

Юридический статус МТЦ менялся несколько раз до 2000 г., когда он вошел в состав Новосибирского научного центра как самостоятельный институт Сибирского отделения РАН.

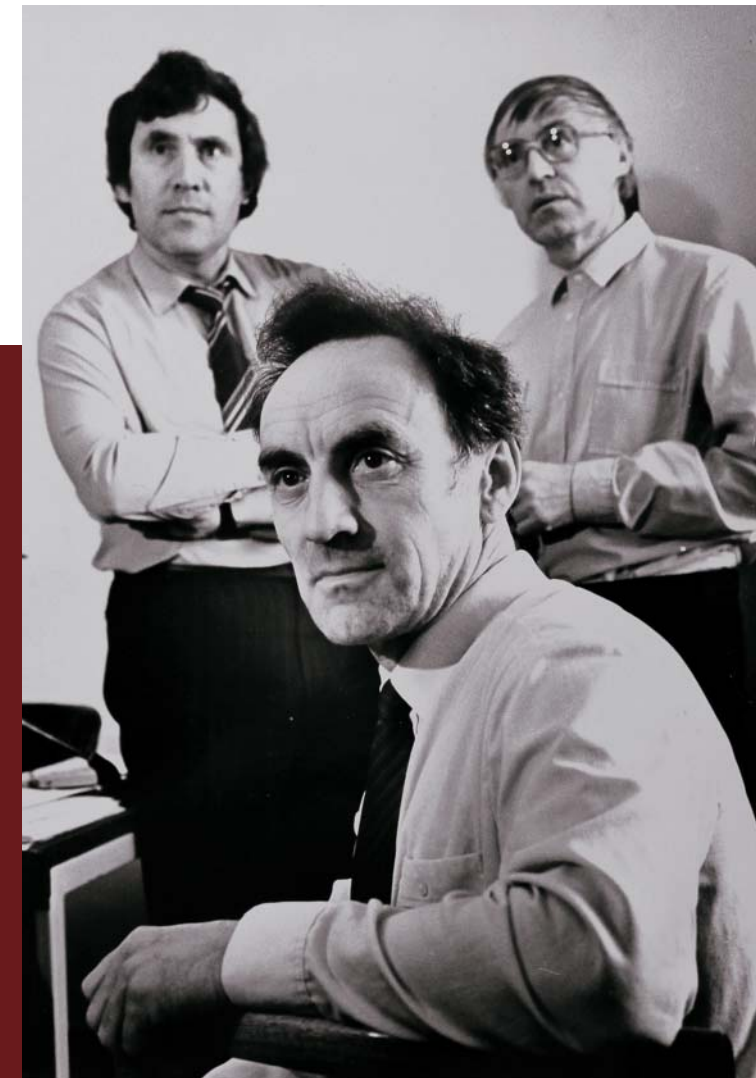
«Нет ничего практичнее хорошей теории»

Уже на первом этапе становления МТЦ была принята концепция всемерной поддержки фундаментальных исследований, однако в течение нескольких лет удавалось поддерживать только те направления, где новосибирские специалисты могли выйти на лидирующие позиции. Среди них выделялись два: первое – разработка новых высокочувствительных методов регистрации короткоживущих радикальных частиц и применение этих методов для исследования магнитных и спиновых эффектов в химических реакциях; второе – синтез и исследование молекулярно-организованных систем.

Так сформировались две общепризнанные научные школы. Первая из них – уже упомянутая школа академика Р.З. Сагдеева – продолжала заниматься традиционной областью фундаментальных исследований, спиновой химией. По словам самого создателя школы, «совершенствование достижений – это очень важно, но фундаментальная наука – это все-таки принципиально новые знания, которые случаются очень редко» (*Цит. по: Жизненная школа академика Сагдеева, Наука в Сибири, 2010, с. 1*).

Среди самых важных результатов этой группы – открытие и детальное изучение двух явлений: влияния постоянного магнитного поля на радикальные реакции в растворах и *магнитного изотопного эффекта*. Что касается последнего открытия, то, как известно, раньше существовал лишь один метод разделения изотопов – на основе разницы их масс. Например, дейтерий в два раза тяжелее водорода, и на этом основаны различия свойств соединений, содержащих разные изотопы. Открытие же физикохимиков заключалось в принципиально ином подходе к разделению изотопов – по разнице их магнитных свойств.

Достижения этой научной школы были отмечены Ленинской премией (1986), а сам ее лидер – Государственной премией РФ в области науки и техники (1994). Совместные проекты отдела магнитных и спиновых явлений получали поддержку от ряда зарубежных организаций и фондов, а сам отдел активно сотрудничал с университетами и научными исследовательскими



В 1986 г. Р.З. Сагдеев, Ю.Н. Молин и К.М. Салихов (слева направо) стали лауреатами Ленинской премии за цикл работ «Магнитно-спиновые эффекты в химических реакциях», опубликованных в 1973–1984 гг. Фото В. Новикова

центрами Японии, Швейцарии, США, Германии, Великобритании и др.

По мере оснащения приборной базы МТЦ СО РАН сложной и уникальной аппаратурой, совершенствования оборудования, включая специальную технику, созданную для выполнения и автоматизации эксперимента, обработки и анализа данных, росла конкурентоспособность его проектов и инновационных разработок. К примеру, созданная в центре установка для наблюдения эффектов химической поляризации ядер имела самое высокое (30 нс) временное разрешение в мире.

Еще один пример – изучение белковых молекул методами спиновой химии в сочетании с лазерными импульсами. С помощью установки лазерного импульсного фотолиза группе д-ра физ.-мат. наук А.В. Юрковской удалось получить на молекуле белка «спиновые метки» высокой степени ядерной поляризации, которые как бы «подсвечивали» отдельные аминокислоты в спектре ЯМР. Изучение этих меток дало информацию о внутримолекулярной подвижности аминокислот, которую невозможно получить другими методами.

ЯМР В ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Магнитные ядра, как и стрелки компаса, без магнитного поля не имеют преимущественного направления. Именно в магнитном поле создается намагниченность ансамбля ядер, которая и используется для получения сигнала ЯМР-и МРТ-изображения.

Энергия взаимодействия ядер с магнитным полем очень мала по сравнению с энергией теплового движения, из-за чего и относительная разность населенностей спиновых состояний в равновесных условиях крайне мала даже в очень сильном магнитном поле. Поэтому основная проблема метода ЯМР заключается в его низкой чувствительности. Для повышения чувствительности метода можно усилить магнитные поля, применяя магниты с катушками в сверхпроводящем состоянии, но возможности такого подхода уже практически исчерпаны.

Сейчас успешно развиваются методы *спиновой гиперполяризации*, т.е. ЯМР и МРТ со спиновыми системами, далекие от равновесного состояния. Это открывает возможность повысить уровень сигнала на несколько порядков. Хотя универсального метода для создания гиперполяризации разных ядер не существует, но можно разработать способы эффективного переноса поляризации с одних ядер на другие, более удобные для регистрации сигналов ЯМР. Одним из ключевых параметров при управлении переносом спиновой поляризации и релаксацией является напряженность магнитного поля, поэтому особое значение имеют эксперименты ЯМР в переключаемых магнитных полях.

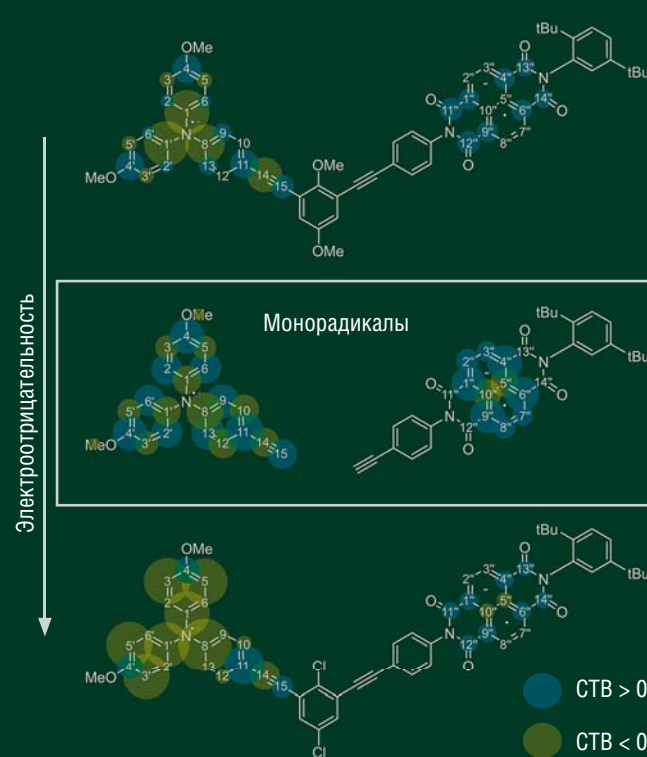
В Международном томографическом центре СО РАН была создана уникальная установка для проведения ЯМР-экспериментов в беспрецедентно широком диапазоне магнитных полей, начиная от поля в 10 тыс. раз слабее магнитного поля Земли до сверхсильных магнитных полей, создаваемых магнитом ЯМР-спектрометров. Она оказалась особенно полезной для решения задач *спиновой химии*, которая изучает влияние магнитных взаимодействий на протекание химических реакций. В частности, на нашей установке можно проводить эксперименты по генерации *ядерной спиновой гиперполяризации* с использованием как фотохимических реакций, так и *параводорода* (формы водорода с антипараллельными спинами ядер).



Доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории фотохимических радикальных реакций МТЦ СО РАН А. В. Юрковская. Фото из архива МТЦ СО РАН

Рассмотрим, к примеру, как с помощью фотохимически индуцированной ядерной поляризации нам удалось получить детальную информацию о структуре короткоживущих промежуточных частиц и магнитных взаимодействиях для соединений, состоящих из трех частей (донор – мостик – акцептор), предлагаемых в качестве элементов солнечных батарей. Это важно, так как знание фундаментальных механизмов реакции фотоиндуцированного переноса электрона требуется для «улавливания» солнечной энергии с помощью искусственной фотосинтетической реакции либо прямым преобразованием в электрическую с помощью органических преобразователей.

После поглощения фотона в таких короткоживущих молекулах за наносекунды происходит многостадийный перенос электрона: сначала от донора на мостик, а затем с мостика – на акцептор. В результате формируется такое состояние, когда положительный заряд расположен в донорной части молекулы, а отрицательный – на акцепторной. Молекулы с двумя неспаренными электронами на удаленных друг от друга фрагментах называются *бирадикалами*, и они быстро гибнут в результате обратного переноса электрона. Известно, что для пары электронов в бирадикале сохраняется состояние *квантовой запутанности*: их магнитные моменты изначально оказываются ориентированными в одном направлении. В таком электронном состоянии обратный перенос электрона происходит очень



Константы сверхтонкого взаимодействия (СТВ) электронов с ядрами углерода ^{13}C в короткоживущих бирадикалах с заместителями с различной электроотрицательностью ($\text{Cl} > \text{OMe}$) в центральном бензольном фрагменте, соединяющим донорную и акцепторную часть молекулы. Площадь цветных кругов пропорциональна величине СТВ. Данные о сверхтонком взаимодействии для бирадикалов получены на основе моделирования зависимости интенсивности сигнала ЯМР за счет химической поляризации ядер от магнитного поля при естественном содержании ^{13}C в образце. По: (Zhukov, Fishman, Kiryutin et al., 2021, J. Chem. Phys. 155, 224201)

ЯМР-установка с быстрым переключением магнитного поля при сохранении высокого спектрального разрешения, созданная в МТЦ СО РАН. Профили напряженности магнитного поля определяются расстоянием от центра сверхпроводящего магнита и силой тока в катушках внутри магнитного экрана

Справа вверху: один из первых ЯМР-спектрометров (на 200 МГц) производства фирмы «Брукер», появившихся в МТЦ. Фото из архива МТЦ СО РАН



медленно, тогда как скорость гибели бирадикалов в другом состоянии – с противоположной ориентацией магнитных моментов электронов – гораздо выше.

Вызвать переворот электронного спина может даже очень слабое магнитное взаимодействие спинов электрона и расположенного рядом магнитного ядра, например, изотопа углерода ^{13}C . Для этого надо выбрать такую напряженность внешнего магнитного поля, при которой уровни энергии состояний с разной взаимной ориентацией спинов электрона совпадут. Переворот спина электрона происходит одновременно с переворотом ядерного спина углерода в противоположном направлении – так формируется ядерная спиновая поляризация.

Содержание изотопа ^{13}C в природном углероде всего 1,1%, так что в любом бирадикале может быть не более одного ядра ^{13}C , поэтому в диамагнитном продукте нет переноса поляризации, что обычно является серьезной проблемой для протонов.

При изучении зависимости поляризации ^{13}C от напряженности магнитного поля на нашей установке было выяснено, что детальное распределение электронной плотности в бирадикалах, времена жизни которых составляют всего десятки наносекунд, сильно зависят от электроотрицательности заместителей центрального бензольного кольца; было обнаружено управляющее воздействие магнитного поля на скорость обратимой химической реакции переноса электрона.

Эти результаты представляют интерес как для фундаментальных, так и для прикладных научных задач. И это лишь

Современный настольный ЯМР-спектрометр.
Фото из архива МТЦ СО РАН



Профессор РАН, д-р физ.-мат. наук К. Л. Иванов (директор МТЦ СО РАН в 2018–2021 гг.) вел исследования в области спиновой химии и развития методов повышения чувствительности ЯМР. В 2020 г. за работы по спиновой гиперполяризации он получил Премию имени Гюнтера Лаукина – одного из основателей МТЦ СО РАН, став первым и пока единственным российским лауреатом этой престижной награды, учрежденной в 1999 г. для поддержки передовых экспериментальных исследований ЯМР с высокой вероятностью создания новых полезных приложений. Фото Л. Панфиловой

Академик РАН В. И. Овчаренко, специалист в супрамолекулярной химии, молекулярном магнетизме, магнетохимии, химии стабильных органических радикалов и многоспиновых координационных соединений, основатель новой научной области – дизайна молекулярных магнетиков. Директор МТЦ СО РАН в 2016–2018 гг. Фото из архива МТЦ СО РАН

Толчком для появления второй научной школы стала настоящая научная «сенсация» – возможность создания нового типа магнитных материалов, *дизайн молекулярных магнетиков*. Как известно, магнетизм обычного чистого железа или редкоземельных металлов определяется на атомарном уровне; такие магниты являются проводниками. В отличие от них, молекулярные магнетики представляют собой макрообъекты (например, монокристаллы), и их магнетизм обеспечивается уникальными физико-химическими свойствами исходных молекулярных блоков, которые синтезируют с помощью методов органической и неорганической химии.

Такие материалы магнитноактивны, как чистое железо, и при этом являются диэлектриками, а в зависимости от состава могут сочетать магнетизм с самыми разными свойствами: прозрачностью, способностью менять цвет из-за разных условий среды и т.п. Крупным практическим достижением в этом направлении стало создание необычного класса объектов – *дышащих кристаллов*, которые могут обратимо изменять свои пространственные характеристики, на что не способны никакие другие твердые тела.

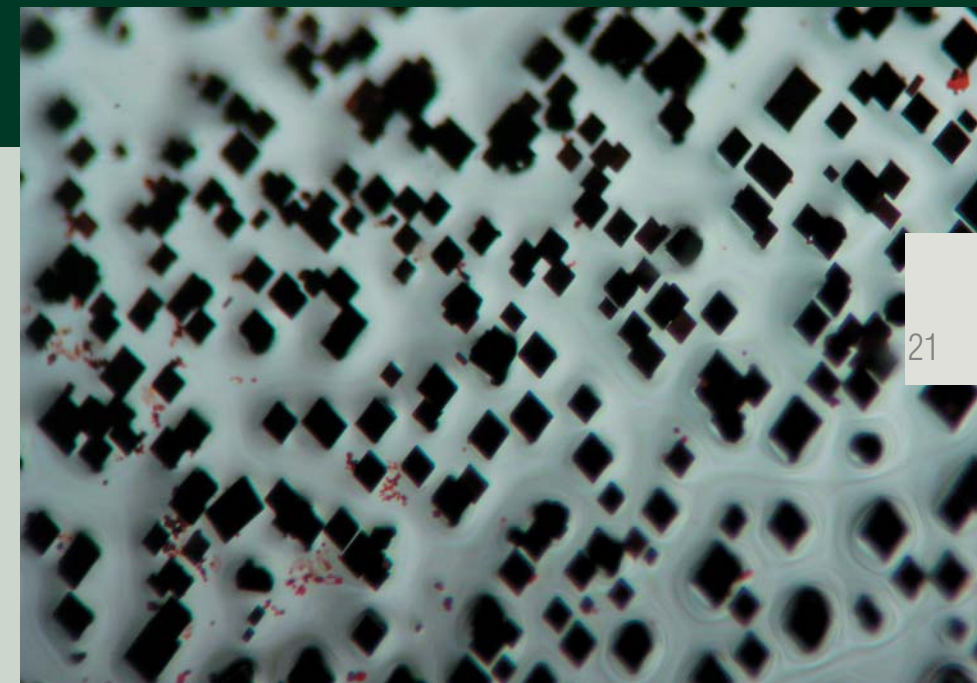
Ведущая роль в создании и развитии *молекулярного магнетизма* – быстроразвивающейся области современной химии – принадлежала академику В.И. Овчаренко. Полученные в центре новые магнитные материалы могут быть использованы в самых разных высокотехнологических областях, в том числе в устройствах для записи информации и в качестве контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии.



один из ряда экспериментов, которые доказали, что с использованием гиперполяризации и переключаемых магнитных полей можно получить уникальную спектральную информацию о релаксации и спиновой гиперполяризации, а также на несколько порядков увеличить интенсивность сигналов ЯМР.

А.В. Юрковская,
заведующая лабораторией
фотохимических радикальных
реакций МТЦ СО РАН

Объем и линейные размеры монокристаллов комплексов меди, выращенных в лаборатории многоспиновых координационных соединений МТЦ СО РАН, меняются с изменением их магнитных свойств.
По: (Артюхова, Романенко, 2020)





Чл.-корр. РАН, профессор, д-р хим. наук, руководитель научного направления «Магнитно-резонансная микротомография» МТЦ СО РАН И. В. Коптюг. Фото из архива МТЦ СО РАН

Все эти годы основным практическим применением в МТЦ была томография, позволяющая изучать не только живые организмы, но и объекты неживой природы. Примером может служить группа ЯМР-микротомографии, возглавляемая чл.-корр. РАН И. В. Коптюгом, которая в начале 1990-х гг. занималась изучением процесса полимеризации и массопереноса в пористых материалах.

Параллельно ученые занялись разработкой принципиально новых методов получения МР-изображений, таких как томография на гиперполяризованных ядрах инертного газа. В частности, группе Коптюга впервые удалось применить ЯМР-томографию для изучения течения газов в условиях химической реакции – ранее считалось, что это попросту невозможно. В дальнейшем оказалось, что кроме газов и жидкостей таким методом можно исследовать твердые материалы и изучать широкий класс процессов переноса вещества, в том числе в структурированных и пористых катализаторах.

Говоря о немедицинских приложениях МР-томографии, нельзя не упомянуть гидрогеологический ядерно-магнитно-резонансный томограф «Гидроскоп», предназначенный для изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий без бурения

СПИНОВЫЕ ИЗОМЕРЫ МОЛЕКУЛ: ОТ ПРОШЛОГО ВСЕЛЕННОЙ К БУДУЩЕМУ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Изомеры – соединения, одинаковые по составу и молекулярной массе, но различающиеся по строению и свойствам. К примеру, две молекулы с одинаковым химическим составом могут представлять собой зеркальное отражение друг друга – это так называемая *оптическая изомерия*. Но видов изомерии много, при этом разные изомеры одной молекулы могут значительно различаться по характеристикам. Это нужно учитывать, к примеру, при создании лекарственных препаратов, активность которых тесно связана с пространственной структурой терапевтических молекул.

В отличие от структурной и пространственной, *ядерная спиновая изомерия* известна значительно меньше. Суть ее в том, что в этом случае изомеры одной молекулы отличаются взаимной ориентацией ядерных спинов составляющих ее атомов. У тех, кто знаком с ядерным магнитным резонансом (ЯМР), такая классификация может вызвать сомнения, ведь известно, что время переворота ядерного спина атома водорода в молекулах жидкостей и растворов составляет лишь несколько секунд, а в газах – и того меньше. Откуда тогда возьмутся стабильные изомеры?

Но дело в том, что спиновые изомеры отличаются не только спиновыми, но и вращательными состояниями. А это значит, что превращение друг в друга двух разных модификаций молекулы требует изменения и их вращательного состояния, а это намного более медленный процесс. Важно то, что для симметричных молекул квантовая механика накладывает жесткие ограничения на волновую функцию молекулы, разрешая одни комбинации вращательных и ядерных спиновых состояний и полностью запрещая другие. В результате, к примеру, молекула водорода (H_2) находится в виде двух устойчивых модификаций: ортоводород и параводород.

Существование ядерных спиновых изомеров – не имеющее аналогов в макромире, сугубо квантовое явление, которое является одним из краеугольных камней в фундаменте квантовой механики. А экспериментальное подтверждение предсказания существования орто- и параводорода (с параллельными и антипараллельными спинами соответственно) стало одним из триумфов квантовой механики на заре ее становления как основы физики микромира. Помимо этого, ядерные спиновые изомеры представляют огромный интерес с научно-практической точки зрения. Одна из областей знания, где активно изучают и используют свойство спиновых изомеров, – астрофизика. Регистрация оптических спектров инфракрасного диапазона для газов в межзвездном пространстве и в таких космических объектах, как молекулярные облака, протозвезды и кометы, позволяет определять орто/пара-соотношение ядерных спиновых изомеров для ряда симметричных молекул



В каталитической реакции гидрирования ацетилена параводородом может идти химическое обогащение ядерных спиновых изомеров образующегося этилена. Это происходит в случае, если взаимная ориентация спинов атомов водорода в ходе реакции сохраняется. Соотношение четырех спиновых изомеров в таком этилене будет зависеть от того, как именно присоединяются два атома молекулы H_2 к ацетилену: по одну сторону от двойной связи $C=C$ (справа вверху) или по разные стороны (справа внизу). По: (Zhivonitko, Kovtunov, Chapovsky, Koptuyg, 2013)

и делать заключения об истории и условиях формирования этих объектов.

Очевидно, что для наиболее полного и надежного исследования свойств спиновых изомеров и особенно для их возможного практического применения необходимо получать газы, характеризующиеся неравновесным соотношением спиновых изомеров. К сожалению, H_2 – фактически единственная молекула, для которой эта задача была решена в связи с перспективой использования жидкого водорода в качестве топлива для ракет и других видов транспортных средств. И решили ее с помощью криогенного охлаждения, однако для других молекул этот путь закрыт.

В настоящее время проблема обогащения спиновых изомеров и изучения их свойств решается с помощью разных подходов, и в этой работе активно участвуют и ученые из лаборатории магнитно-резонансной микротомографии МТЦ СО РАН. Один из используемых подходов основан на процессе *гиперполяризации* – принудительном ориентировании ядерных спинов атомов молекулы. Гиперполяризация ядерных спинов – очень активно развивающаяся область магнитного резонанса, ведь за ее счет можно достичь усиления сигнала ЯМР в тысячи раз и более.

В частности, с помощью метода динамической поляризации ядер при определенных условиях, в том числе при температуре, близкой к абсолютному нулю, можно в одном образце ориентировать в одном направлении до 50–80% ядерных спинов, что для симметричных молекул соответствует высокой степени обогащения одним из спиновых изомеров. Проблема состоит в сохранении такого состояния при последующем фазовом переходе в жидкость или газ.

Еще один подход к обогащению спиновых изомеров, используемый в лаборатории, основан на химическом синтезе этих молекул. Ранее было показано, что спиновое состояние параводорода может частично сохраняться в промежуточных и конечных продуктах химических реакций. Нарушение исходной спиновой симметрии молекул H_2 может обеспечить неравновесное соотношение спиновых изомеров продуктов реакции, что приводит к усилению сигнала ЯМР на 3–5 порядков.

На этой основе уже развивается целый ряд методов гиперполяризации ядерных спинов, которые легче реализовать на практике при меньших затратах на оборудование. Новосибирские исследователи предложили и впервые успешно опробовали подход с использованием параводорода для синтеза спиновых изомеров этилена.

Как отмечалось выше, гиперполяризация ядерных спинов позволяет значительно повысить чувствительность ЯМР-спектроскопии и магнитно-резонансной томографии (МРТ), а также разрабатывать принципиально новые приложения для изучения объектов живой и неживой природы. В лаборатории этот подход развивается в двух стратегических направлениях: создание на основе ЯМР и МРТ высокочувствительных методов изучения механизмов важных каталитических процессов и новейших инструментов для медицинской диагностики.

Так, использование параводорода позволяет, к примеру, детально описать на молекулярном уровне механизмы гидрокрекинга нефтяных фракций, что важно для таких многотоннажных производств. А возможность детектирования методами ЯМР/МРТ изменений клеточного метаболизма



Настройка ЭПР-спектрометра в лаборатории ЭПР-спектроскопии МТЦ СО РАН. 2023 г. Фото из архива МТЦ СО РАН

гиперполяризованных веществ, введенных в организм животного или даже человека, дает возможность уже сегодня заниматься разработкой методов сверхранней диагностики различных заболеваний и патологий.

В настоящее время методы усиления сигнала в ЯМР и МРТ за счет использования спиновых изомеров реализуются исключительно на основе применения параводорода, но в будущем речь будет идти о многоатомных молекулах. В результате мы можем ожидать, за счет огромного повышения чувствительности магнитно-резонансной томографии, значительное расширение круга промышленно важных каталитических процессов, механизмы которых станут доступны для исследования методами ЯМР, а также заметный прогресс в медицинской диагностике благодаря использованию в экспериментальных исследованиях биосовместимых препаратов с высокой степенью ядерной гиперполяризации.

Так что изучение и практическое применение ядерных спиновых изомеров молекул может не только пролить новый свет на прошлое нашей Вселенной, но и внести заметный вклад в будущее человечества.

*И.В. Коптюг,
руководитель научного направления
«Магнитно-резонансная микротомография»
МТЦ СО РАН*

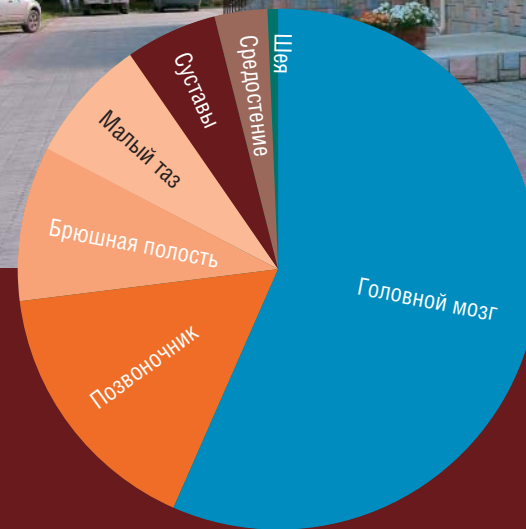
скважин. Первый такой прибор был разработан и внедрен в практику геологоразведочных работ еще в середине 1970-х гг. в лаборатории ИХКиГ, а к середине 1980-х гг. занял прочные позиции в поисковой геологоразведке.

Еще одним немедицинским применением метода МРТ является *каротаж*, основанный на ядерном магнитном резонансе (ЯМК). Этот метод позволяет геофизикам, специалистам по разведке и разработке месторождений достаточно просто выделять типы подземных флюидов, их объем в пласте, вскрытом скважиной, прогнозировать расположение и извлекаемость углеводородов.

МРТ-диагност

Современную медицину невозможно представить без инструментальных методов исследования морфологии и функциональных состояний человеческого организма, а также в диагностике и лечении наиболее распространенных заболеваний человека. По сравнению с рентгеновскими и радиоизотопными методами техника магнитно-резонансного изображения использует «низкоэнергетические» радиоволны метрового диапазона. Это делает обследование безопасным, не требует обязательного применения контрастных веществ и дает возможность получать изображения мягких тканей в разных плоскостях, с высоким разрешением и контрастностью.

К началу 2000-х гг. МР-томографы использовались лишь в 80 лечебных учреждениях России. В Новосибирске первые такие приборы появились в клиниках



Структура МРТ-обследований в МТЦ СО РАН в 2004–2005 гг. Более половины всех обследований, которые проводились в диагностическом отделе МТЦ, были связаны с диагностикой и лечением заболеваний сосудов головного мозга. По: (Савелова, 2018)

Медицинский центр «МРТ ТЕХНОЛОГИИ» Международного томографического центра СО РАН осуществляет весь спектр лучевых методов диагностики на самом современном уровне: магнитно-резонансную томографию (МРТ), мультиспиральную компьютерную томографию (МСКТ) и ультразвуковые исследования (УЗИ). Фото из архива МТЦ СО РАН

к середине 1990-х гг., однако приоритет в научных исследованиях и медицинской диагностике по основным направлениям МР-томографии всегда оставался за Международным томографическим центром.

Научные изыскания центра были направлены на расширение диагностических возможностей медицинского применения МР-томографии. Так, на основе исследования релаксационных характеристик здоровых и патологически измененных тканей пациентов были разработаны оригинальные методы ранней диагностики злокачественных опухолей и метастазов, заболеваний крови, методы контроля по ходу терапевтической и хирургической коррекции и др.

Более половины всех обследований, которые проводились в диагностическом отделе МТЦ, были связаны с диагностикой и лечением заболеваний сосудов головного мозга. Широкое распространение цереброваскулярной патологии, часто сопровождающейся острыми нарушениями мозгового кровообращения, требовало разработки новых высокоинформативных неинвазивных методов исследования сосудов головы и шеи.

Лицензирование и аккредитация МТЦ как диагностического медицинского центра состоялись в 1993–1995 гг. Согласно полученной лицензии, диагностический отдел центра осуществлял свою деятельность в односменном режиме (с 9 до 18 час. с учетом 5-дневной рабочей недели). Однако, как правило, прием проводился до последнего клиента. Уже в 1996 г. в центре было проведено МРТ-обследование 400 человек (на 15% больше по сравнению с предыдущими годами), что было связано с переоснащением МР-томографа, запуском новых градиентных систем и квадратурного детектирования. Благодаря новым МРТ-методикам, разработанным сотрудниками МТЦ, инновационным подходам в области сканирования и обработки изображений к началу 2000-х гг. количество ежегодно обследуемых пациентов увеличилось на порядок (4933 в октябре 2004 г. – сентябрь 2005 г.)

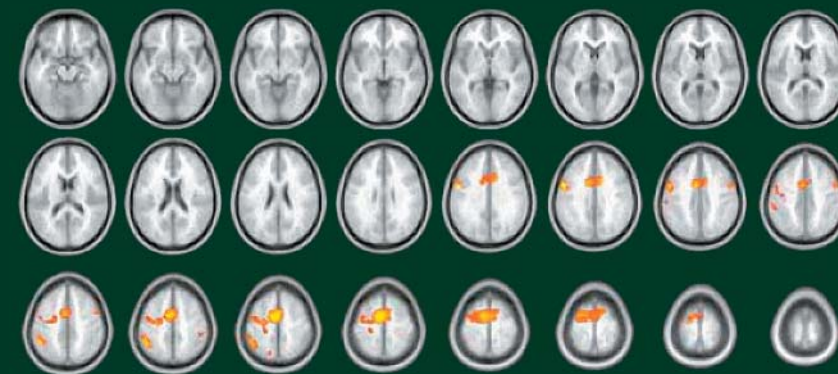
Тонкосрезовые трехмерные МРТ-методики позволяют определить наличие стойких сужений, патологических отверстий-фистул и нетипичных путей оттока спинномозговой жидкости. Справа – выраженное воронковидное сужение дистальных отделов водопровода мозга у ребенка с вентрикуломегалией (увеличением желудочков). По: (Тулупов и др., 2020)



Ежегодно более 10 тыс. человек проходят томографическое исследование в МТЦ СО РАН, получая подробное высокопрофессиональное врачебное заключение о состоянии здоровья. Благодаря использованию специализированного оборудования в настоящее время стало возможным проведение МРТ молочной железы, получение трехмерных изображений сосудов с динамической оценкой скорости потока крови в кинорежиме. Неинвазивные спектроскопические исследования дают информацию о динамике метаболических и биохимических процессов в поврежденных участках головного мозга, предстательной железы, печени и других органов

Метод быстрого картирования макромолекулярной протонной фракции (МПФ), основанный на математической обработке обычных МРТ-изображений, можно использовать для внутриутробной диагностики врожденной злокачественной опухоли мозжечка, не выявляемой с помощью традиционного МРТ-обследования. По: (Коростышевская и др., 2020)

Наиболее перспективным в этом отношении оказалось применение МР-томографической визуализации биологических жидкостей, методика которой разрабатывалась в лаборатории медицинской диагностики МТЦ. Диагностическим приложением нового метода стала оценка кровотока по артериальным и венозным сосудам в норме



Карты активности головного мозга были сняты у испытуемых в пилотном эксперименте с биоуправлением. Для увеличения ответа целевой области (первичной моторной коры) участники использовали воображаемое сжатие кисти руки. По карте хорошо видна активность во вторичной моторной области обеих полушарий. По: (Мельников и др., 2016)



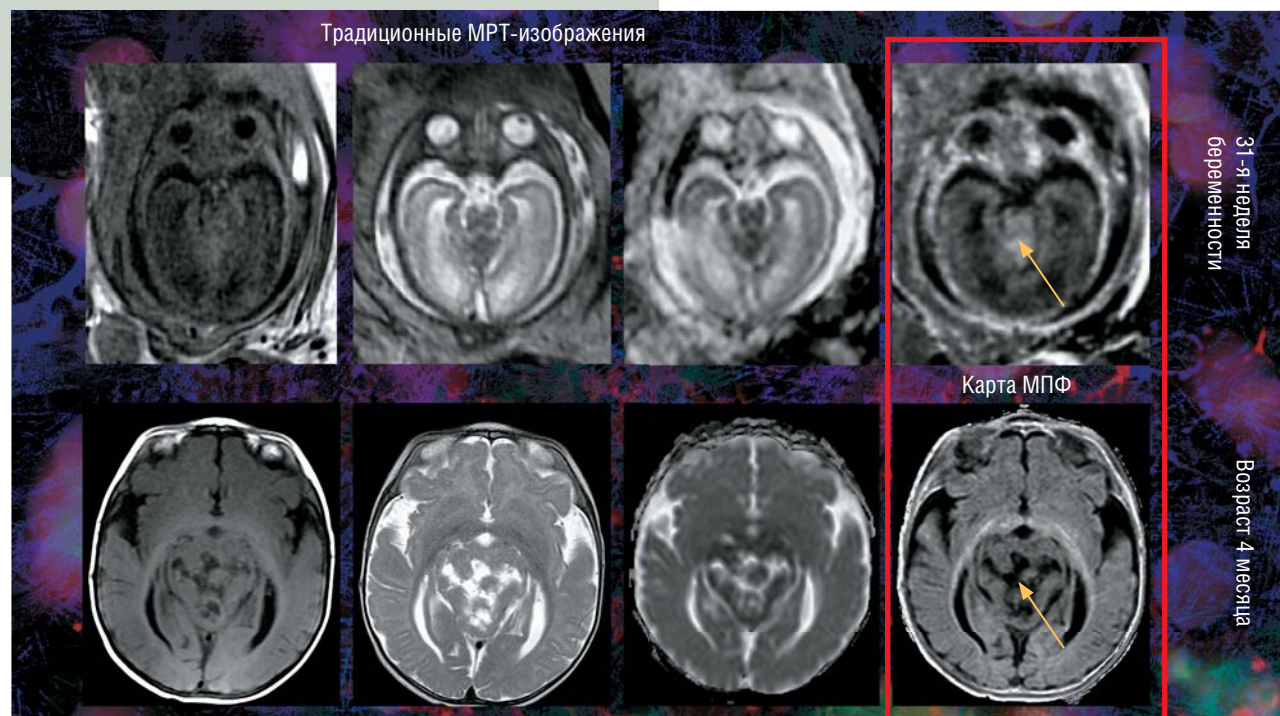
Академик М. Б. Штарк, главный научный сотрудник НИИ молекулярной биологии и биофизики, структурного подразделения ФИЦ фундаментальной и трансляционной медицины (Новосибирск)

и патологии, а также исследование нарушений параметров тока крови и цереброспинальной жидкости в головном и спинном мозге.

С появлением новых томографических приборов стало возможным собирать данные от нескольких областей исследуемого органа одновременно, а разработка и внедрение специальных «немагнитных» мониторинговых систем позволили контролировать жизненно важные параметры (пульс, температуру, ЭКГ и др.) во время исследования. В результате метод МРТ начал применяться для обследования пациентов с неврологической и нейрохирургической патологией, а специалистам по клинической неврологии и когнитивной социальной психологии стали доступны такие новые методики, как функциональная МРТ (фМРТ), с помощью которых можно было визуализировать временную и пространственную динамику работы мозга в режиме реального времени.

Один из успешных проектов в этой области – создание технологии нейробиологического управления, базирующейся на принципах адаптивной обратной

связи. Инициатором этих работ в нашей стране стал академик М. Б. Штарк. Суть этого современного компьютерного лечебно-оздоровительного инструментария состоит в том,





Значительную часть научных сотрудников МТЦ СО РАН составляет молодежь, средний возраст – 37 лет. МТЦ также является одним из базовых институтов СО РАН, где проходят дипломную и преддипломную практику студенты физического факультета и факультета естественных наук Новосибирского государственного университета. 2023 г.
 Фото из архива МТЦ СО РАН

чтобы обучить пациента «руководить» виртуальным игровым сюжетом, волевым усилием меняя показатели своих физиологических характеристик, включая электрическую активность мозга.

В одной публикации, безусловно, невозможно даже перечислить все достижения в фундаментальных исследованиях и прикладных разработках, которые стали результатом многолетней деятельности специалистов Международного томографического центра СО РАН. Можно лишь добавить, что организация центра, ориентированного на решение теоретических и прикладных проблем магнитно-резонансной томографии, стала прорывом в этой области в масштабах не только Сибирского отделения и повлекла за собой бурное развитие практических приложений, в первую очередь в медицине и здравоохранении.

В начале 2000-х гг., с включением МТЦ в состав Новосибирского научного центра в качестве самостоятельного института, стартовал новый этап в развитии и применении метода ЯМР в самых разных областях науки и техники: от когнитивной нейрологии и археологических изысканий до интерпретации геофизических данных, решения лингвистических задач и др. И сейчас МТЦ СО РАН продолжает свою научную и практическую деятельность в качестве одного из ведущих научных учреждений академической науки в Сибири и является лидером в разработке и применении МРТ как в сибирском регионе, так и в России.

Павлины – привычные обитатели парковой зоны, окружающей здания центра: за прошедшие годы здесь сменилось не одно поколение этих царственных птиц с сибирской пропиской.
 Фото из архива МТЦ СО РАН

Литература

- Жизненная школа академика Сагдеева // Наука в Сибири. 2010. С. 1.*
Институт, который построил Сагдеев: Беседа // Санкт-Петербургский университет. 2004. № 6. С. 6.
 Молин Ю. Н. *Магнитные и спиновые эффекты в реакциях ион-радикальных пар: спиновая когерентность, механизмы превращений, новые методы исследования: ст. о науч. шк.; рук. НИИ Ю.Н. Молин. Новосибирск, 2004. [Электронный ресурс].*
 Нотман Р. К. *Преимственность: Научные школы СО РАН / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 539 с.*
 Савелова О. А. *История становления и развитие магнитно-резонансной томографии в Сибири: предпосылки, институционализация, практические применения (на примере Международного томографического центра СО РАН): дис. ... канд. ист. наук: 07.00.10. Томск, 2018. 276 с.*
 Zhukov I., Fishman N., Kiryutin A. et al. *Mapping ¹³C hyperfine couplings and exchange interactions in short-lived charge separated states of rigid donor-bridge-acceptor dyads // J. Chem. Phys. 2021. V. 155, N. 22. P. 224201.*