

ПРИМЕНЕНИЕ ЯМР ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ В СИСТЕМАХ КОЛЛОИДНОГО КРЕМНЕЗЕМА

© 2012 Е. В. Морозов, О. В. Шабанова, О. В. Фалалеев

*Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН,
ул. Мира 53, 660049 Красноярск, Россия*

Аннотация. В работе представлены результаты ЯМР томографических исследований зелей коллоидного кремнезема, полученных из силикатов щелочных металлов кислотным выщелачиванием. Исследована динамика времен ядерной спин-решеточной и спин-спиновой релаксации в процессе гелеобразования, а также визуализировано пространственное распределение протекающих процессов. Рассмотрена методологическая сторона проблемы обеспечения контраста на ЯМР томограммах модельных коллоидных систем при золь-гель переходе. Экспериментально продемонстрирована актуальность разработки методологии исследования межфазных границ с помощью нового для данного направления метода.

Ключевые слова: ЯМР томография, коллоидный кремнезем, золь-гель переход, межфазные границы.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что метод ЯМР томографии (магнитно-резонансной томографии или сокращенно МРТ) хорошо зарекомендовал себя как неинвазивный способ для исследования непрозрачных объектов. Традиционно основное внимание данного метода было сосредоточено на медицине и близких к ней приложениях. Это связано с огромным диагностическим потенциалом метода наряду с его безопасностью. В связи с этим в развитии ЯМР томографии стали преобладать задачи, решение которых было связано напрямую с улучшением контраста изображений, сокращением времени получения изображения [1—5] и др. Специфика медицинских и биологических задач характеризуется в первую очередь необходимостью визуализации морфологии тела, органов или тканей. При этом не имеет значения, распределение какого именно параметра отражает ЯМР томограмма, ее целью в данном случае является обеспечение максимального контраста [6]. Как правило, органы или ткани (в медицинских или биологических объектах) строго дифференцированы функционально и морфологически. Это значит, что на изображении довольно легко можно различить и соотнести определенные участки. Кроме этого, между тканями всегда присутствуют четкие границы раздела, также улучшающие контраст на изображении.

Совершенно другая ситуация сложилась в немедицинских приложениях ЯМР томографии: исследовании процессов пропитки и сушки, цементирования, транспорта в пористых средах, сорбции, катализа и химических реакций [7, 8] и т. д. Применение МРТ в области материаловедения пока несколько ограничено в связи с техническими трудностями (в отличие от живых тканей, объекты исследования здесь не всегда содержат нужное количество достаточно подвижных резонирующих ядер). Специфика ряда материаловедческих задач заключается в том, что не всегда изучаемый объект имеет фазы или области с четкими границами раздела. Так, при исследовании транспорта растворителя часто наблюдается размытый фронт (например, при набухании углей [9] или полимеров [10]); при затвердевании цементирующихся систем участки с разной степенью связанности могут иметь слабовыраженные (или размытые) границы, трудно различимые на изображении [11]. В связи с этим, возникает проблема визуализации внутренней структуры объектов, содержащих нескольких фаз, которые слабо отличаются по своим свойствам или не имеют достаточно резкой границы раздела. Ярким примером, иллюстрирующим эту проблему, является различение отдельных фаз в смеси плотного и жидкого куриного белка, которые несколько отличаются по плотности, вязкости и прозрачности.

Попытка найти на ЯМР томограмме яйца (*in vivo*) их расположение не приводит к успеху [12—14]; более того, даже ЯМР изображение ампулы (*in vitro*) со смесью густого и жидкого белка (одна фракция поверх другой) не позволяет однозначно идентифицировать эти фазы [15].

Важным с технологической точки зрения классом исследуемых с помощью ЯМР томографии систем, в которых может возникнуть описанная выше проблема, являются коллоиды и процессы, протекающие в них. Сюда можно отнести коллоидные суспензии, золи и гели различного химического состава (гидрозоли оксидов металлов, силикатные вяжущие системы, растворы органических полимеров и др.), процессы седиментации, гелеобразования, коагуляции и др. Особый интерес представляют собой системы на основе коллоидного кремнезема, которые нашли огромное и разнообразное применение [16, 17]. Основные свойства получаемых на его основе материалов формируются на стадии золь-гель перехода (например, структура искусственных опалов при их синтезе [18]). Соответственно, исследованию процессов гелеобразования уделяется большое внимание, и посвящено много работ, включая методы на основе ЯМР (спектроскопия и релаксометрия [19—21]). Однако, хорошо известно, что при золь-гель переходе фаза образующегося геля по плотности практически не отличается от окружающей гелевые структуры золя [22]. Из-за описанной выше проблемы обеспечения необходимого контраста при визуализации тонких различий между фазами, практически отсутствуют работы по применению ЯМР томографии для исследования золь-гель перехода в коллоидном кремнеземе. В работе [23] ЯМР томография использовалась для исследования гелеобразования в кислых золях кремнезема, полученных из синтетических силикатов (пеносиликата и базальтовой минеральной ваты), имеющих промышленное значение, но содержащих большое количество примесей. В данной работе представлены результаты ЯМР томографических исследований кислых золей коллоидного кремнезема, полученного из чистого жидкого стекла, а также рассмотрена методологическая сторона проблемы обеспечения контраста в коллоидных системах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве объекта исследования использовались образцы коллоидного кремнезема, получен-

ного кислотным выщелачиванием ортофосфорной кислотой из силикатов щелочных металлов:



с различным содержанием растворенного кремнезема. Для удобства в данной работе образцы обозначены как А/В, где А — объем исходного раствора силиката (мл), В — количество ортофосфорной кислоты (моль). Известно, что с увеличением доли растворенного кремнезема скорость гелирования полученных золей существенно возрастает [16—17, 22]. В свою очередь, скорость гелеобразования совместно с рН системы коренным образом определяют пространственную структуру геля. Это дает возможность регулировать размеры частиц, размеры и объемную долю пространственных ассоциатов. Таким образом, были получены образцы, в которых в процессе гелеобразования формировалась фаза геля в различных частях образца золя, которая очень слабо отличается по своим свойствам от окружающей ее среды. Также искусственно был получен образец, содержащий фазу быстрого сформировавшегося геля (в виде коагулировавшего хлопьевидного осадка) со значительно отличающимися от золя свойствами. Полученные золи заливались в ампулу с внутренним диаметром 22 мм и помещались в датчик ЯМР томографа при комнатной температуре. Все томографические исследования были выполнены с использованием ЯМР микротомографа на базе Bruker AVANCE DPX 200, с градиентным блоком GREATER 3/60, в поле 4.7 Тл, на датчике PH MICRO 2.5 (диаметр радиочастотной катушки 25 мм). Изображения были получены по ядру ^1H .

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЯМР ИЗОБРАЖЕНИЙ

Принципы работы ЯМР томографии достаточно хорошо описаны [24]. Необходимо остановиться лишь на описании использованных методик. В данной работе использовались несколько ЯМР томографических методик для измерения времен ядерной спин-решеточной T_1 и спин-спиновой T_2 релаксации и получения изображений. Для измерения T_1 использовалась методика инверсии-восстановления (Inversion-recovery technique), а для измерения T_2 — методика Карпа-Парселла-Мейбума-Гилла (CPMG technique) [25]. Для получения изображения использовалась методика на основе спин-эхо (Multi Slice Multi Echo technique [25]). Базовая временная диаграмма импульсных последовательностей данной методики представлена на рис. 1. В данном типе методик используется два прикладываемых РЧ импульса: 90° (возбуждающий) и 180° (генерирующий сигнал спинового

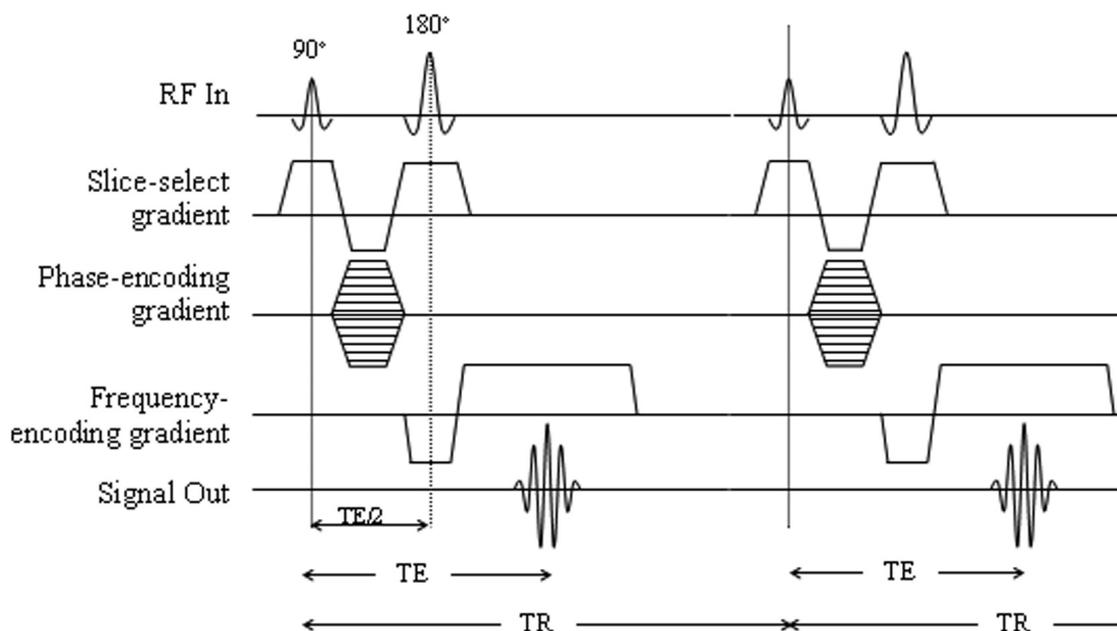


Рис. 1. Базовая временная диаграмма импульсных последовательностей для методики спин-эхо

эхо). Главным преимуществом, определившим использование данной методики, является возможность получения взвешенных по различным параметрам (времена релаксации, протонная плотность) изображений.

Представленная импульсная последовательность определяется набором параметров: TE (время эхо) — интервал между 90° импульсом и эхо сигналом; TR (время повторения) — интервал между каждой прикладываемой импульсной последовательностью (от первого возбуждающего 90° импульса до следующего). Импульсная последовательность повторяется заданное число раз. Интенсивность сигнала I_{SE} после 180° импульса может быть выражена как [26]:

$$I_{SE} = k \rho \left[1 - \exp\left(\frac{TE - TR}{T_1}\right) \right] \exp\left(\frac{-TE}{T_2}\right),$$

где T_1 — время спин-решеточной релаксации, T_2 — время спин-спиновой релаксации, ρ — пространственно зависимое распределение протонной плотности в образце, k — константа. Можно видеть, что для достаточно больших значений TR (часто экспериментально устанавливается $TR \approx 5T_1$ при $TR \gg TE$) можно пренебречь вкладом квадратных скобок (зависимостью I_{SE} от T_1), поскольку он близок к 1. При этом подбирая параметр $TE \approx T_2$ (сохраняя достаточную интенсивность сигнала), можно добиться, что вклад от последнего члена в I_{SE} становится определяющим, т.е. получается так

называемое T_2 -взвешенное изображение. Варьируя параметр TE можно добиться желаемой глубины T_2 -взвешенности (в данном случае при увеличении TE контрастность T_2 -взвешенного изображения улучшается). Подбирая $TE \ll T_2$ (сохраняя $TR \approx 5T_1$), можно приблизить экспоненту к 1, что даст максимальный вклад в I_{SE} зависимости от ρ . Таким образом, получается ρ -взвешенное изображение (в котором I_{SE} пропорционально ρ). Чтобы получить T_1 -взвешенное изображение необходимо уменьшить TR (сохраняя $TE \ll T_2$) так, чтобы зависимость от T_1 превалировала над зависимостью от ρ . Получение определенной взвешенности позволяет обеспечить возможность локального исследования динамических свойств образца.

Кроме активно используемой взвешенности на изображении, ЯМР томография позволяет получать карты распределения определенного параметра (карты T_1 , T_2 , коэффициента самодиффузии D и др.). Принципиальным отличием карт от взвешенных по этим же параметрам изображений является отображение абсолютных значений параметра вместо относительной зависимости. Это позволяет количественно измерять динамику процессов и получать дополнительную полезную информацию. Разрешение и отношение сигнал/шум на картах, как правило, значительно хуже, чем на взвешенных изображениях, поэтому их использование ограничено. В данной работе использовались как взвешенные изображения, так и T_1, T_2 -карты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Основными параметрами, определяющими ЯМР томографические свойства образца и условия его визуализации, являются значения времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации. На рис. 2 представлены графики временной эволюции T_1 и T_2 для набора образцов с различным содержанием кремнезема. Общий характер релаксационного поведения аналогичен изученному ранее для зольей на основе синтетических силикатов [23]. В первые часы гелеобразования наблюдается максимальное падение T_1 , T_2 , за которым следует продолжительный пологий спад. Естественно предположить, что

наиболее интересным промежутком для томографического исследования является период с самой яркой динамикой.

По мере увеличения доли растворенного кремнезема времена релаксации закономерно падают, что отчетливо видно на графике. Поскольку при этом время золь-гель перехода также сокращается, то нижние кривые заканчиваются раньше, так как в твердом состоянии динамика T_1 , T_2 различна для верхней и нижней частей высыхающего образца и не представлена на графике. При достижении определенной концентрации кремнезема гелеобразование наступает практически сразу. Можно было бы ожидать, что динамика T_1 и T_2 для таких образцов характеризуется наименьшими значениями

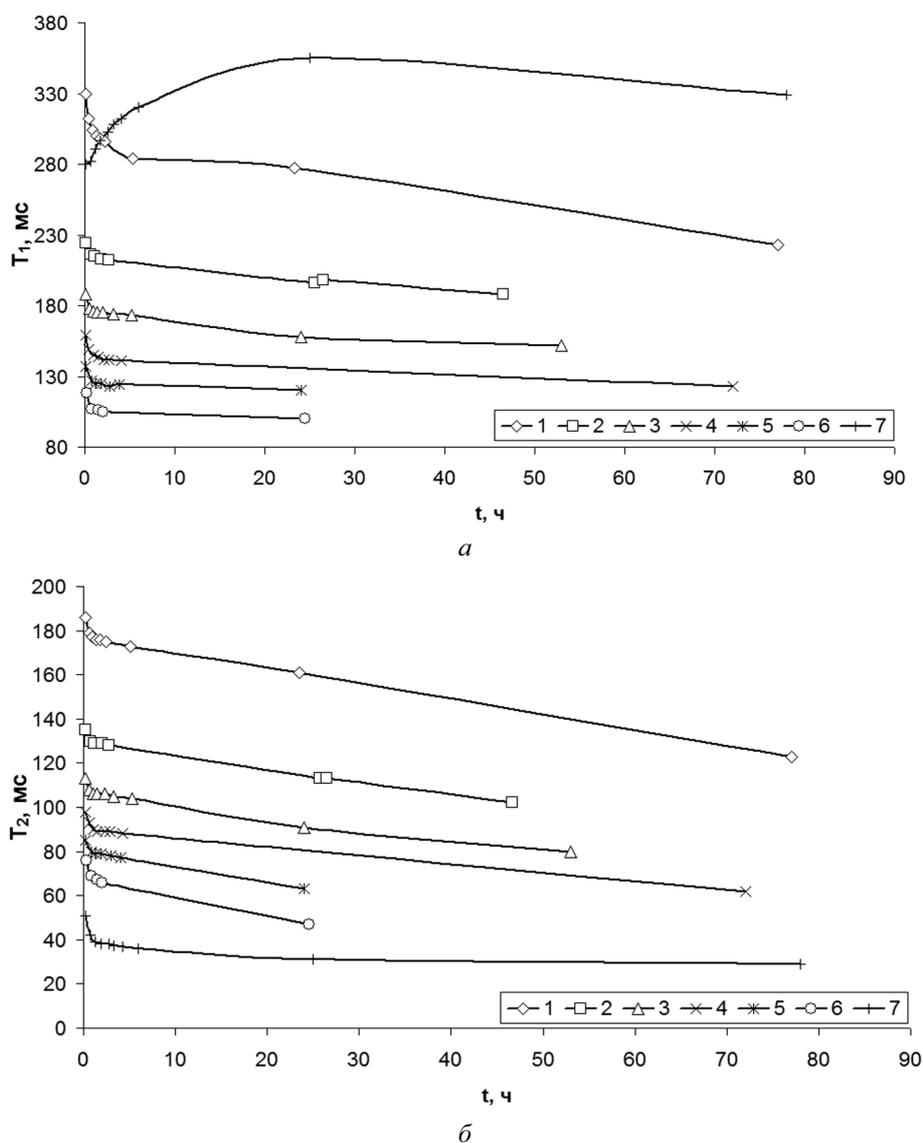


Рис. 2. Зависимость времен спин-решеточной (а) и спин-спиновой (б) релаксации от времени для зольей с различным содержанием растворенного кремнезема: 1 — 2/0,04; 2 — 3/0,04; 3 — 4/0,04; 4 — 5/0,04; 5 — 6/0,04; 6 — 8/0,04; 7 — 9/0,04

среди представленных образцов. Но характер поведения T_1 существенно отличается от всех остальных. Во-первых, значение T_1 велико и находится в области малых концентраций кремнезема. Во-вторых, наблюдается наличие максимума на кривой. Такое необычное поведение было объяснено тем, что быстро сформировавшаяся сетка геля захватила большое количество золя в свои поры. Значение T_2 золя, заключенного в матрицу геля, находится в соответствующем диапазоне (поскольку в значительной мере определяется динамикой протонов в порах). А значение T_1 близко к разбавленным зольям, поскольку из него вышел избыток кремнезема в окружающую сформировавшуюся матрицу геля (при этом влияние размера пор на T_1 менее существенно). При старении в таких образцах наблюдается синерезис.

ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе проведенных релаксационных измерений было принято решение об исследовании самых ранних стадий гелеобразования. На рис. 3 представлены T_2 -взвешенные изображения продольных сечений образцов в течение первого часа после приготовления золя. На изображении отчетливо видны неоднородности в виде более темных областей преимущественно вертикальной ориентации. Как правило, они берут начало от верхней (приповерхностной) части образца золя. Отличительной особенностью данных неоднородностей является отсутствие четких границ. На профилях (одномерных графиках I_{SE} вдоль определенных

линий на томограмме), представленных под изображениями, можно обнаружить уменьшение интенсивности в областях, соответствующих данным неоднородностям (профили, показывающие интенсивность изображения, проведены на небольшом расстоянии ниже поверхности образца параллельно ей). Глубина падения интенсивности сильно варьируется, сохраняя при этом размытый характер границ представленных неоднородностей.

Поскольку данные эффекты наблюдаются исключительно в ранние периоды старения золя, то следует соотносить их с формированием первичных кремнеземных ассоциатов [16—17, 22]. Таким образом, процессы, формирующие более массивные агрегаты частиц кремнезема, приводят к локальному понижению подвижности дисперсионной среды, что отражается на изменении T_2 . При этом ЯМР томография обнаруживает пространственную неоднородность протекания данных процессов. Это хорошо согласуется с современными представлениями фрактальной теории гелеобразования, согласно которой агрегаты, образующиеся в процессе гелеобразования, являются достаточно разветвленными и имеют протяженный характер [17].

Сложный характер пространственного распределения описанных процессов можно наблюдать на поперечных сечениях образца (рис. 4, сечения представлены для приповерхностной области). Видно, что максимальное сосредоточение неоднородностей (а также наилучший контраст) наблюдается в верхних областях, где они имеют разноо-

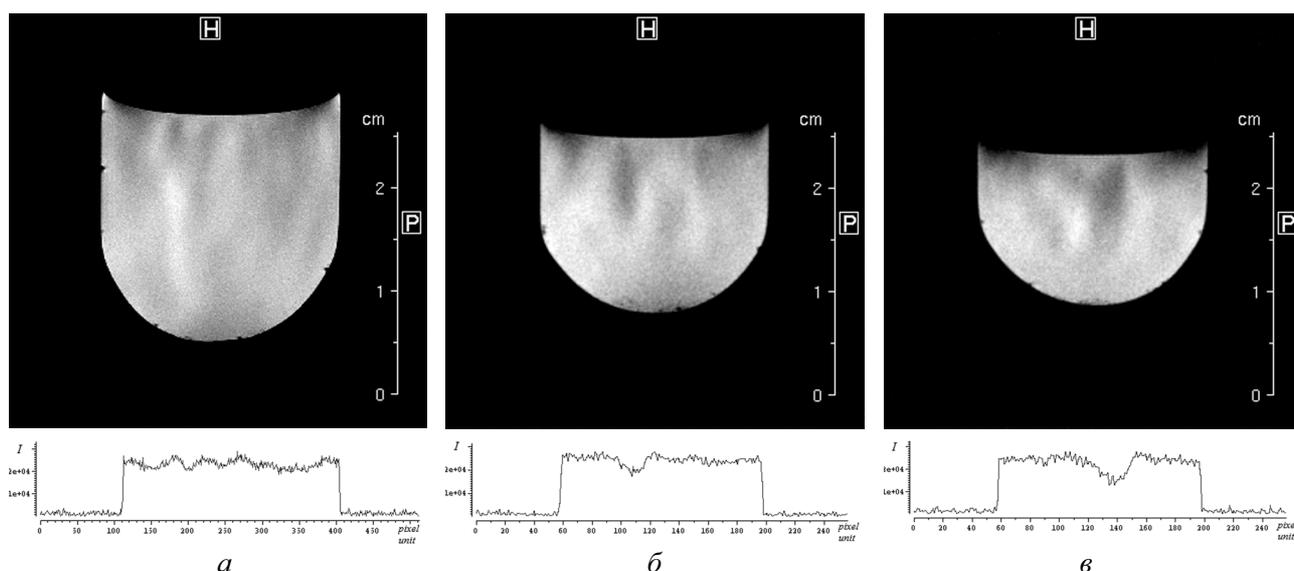


Рис. 3. Изображения центральных продольных сечений образцов золя с горизонтальными профилями с содержанием растворенного кремнезема: *a* — 7/0,04; *б* — 5/0,04; *в* — 3/0,04; поле обзора 40 мм, толщина среза 1 мм, матрица 512×512 (*a*), 256×256 (*б*, *в*)

бразную форму и расположение. При этом сохраняется их вертикальная составляющая вглубь образца.

Необходимо отметить, что T_1 , ρ -взвешенные изображения не содержат описанных неоднородностей, что отражает слабое влияние незначительного изменения подвижности на эти параметры, и как следствие, очень слабый контраст. При протекании процессов гелеобразования происходит формирование фазы «первичного» геля, по своим свойствам чрезвычайно слабо отличающегося от окружающего золя. Незначительность этого различия хорошо видна на томограммах: все неоднородности проявлены с минимальным контрастом и размытыми границами (исключительно благодаря чувствительности T_2 даже к столь малым изменениям). Поэтому, задача визуализации таких фаз в сложных системах актуальна для ЯМР томографии.

Как было отмечено выше, с ростом доли растворенного кремнезема скорость гелеобразования существенно возрастает. Это связано также и с тем, что увеличивается концентрация растворенных солей (фосфатов) и, соответственно, влияние ионов на двойной электрический слой частиц. Это приводит к разрушению поверхностных адсорбционных слоев коллоидных частиц и падению их агрегативной устойчивости. Так, при увеличении концентрации кремнезема до 9/0,04 система гелирует уже через 3—5 мин., проявляя аномальный характер поведения T_1 (график на рис. 2).

В затвердевшем образце (геле) отсутствуют описанные выше неоднородности (что естественно), но через 40—60 мин. наблюдается явление

синерезиса в виде выделения дисперсионной среды из массы геля (рис. 5). Через некоторое время выделившаяся жидкость сама тоже гелирует, поскольку является золем с меньшим содержанием кремнезема, избыток которого ушел в матрицу геля. Данное явление (синерезис) хорошо описано в литературе (например, [27]). Горизонтальные профили (рис. 5) демонстрируют, что две фазы различного по происхождению геля значительно отличаются по своим ЯМР релаксационным свойствам и имеют четкую границу раздела.

Структура и свойства гелей, образующихся при быстром формировании (2—30 мин.), значительно отличаются от таковых для остальных (гелирующих дольше пары часов). Можно искусственно создать в приготовленном золе фазу более плотного геля. В таком случае свойства фаз будут отличаться уже значительно. На рис. 6 представлены изображения золя (5/0,032), в котором на дне находится небольшое количество фазы быстро сформировавшегося геля в виде хлопьевидного осадка. В отличие от первичных гелевых структур в областях с размытыми границами, описанных ранее, в данном случае наблюдается неоднородность с четкими границами раздела фаз. Можно различить даже отдельные крупные частицы, соединенные тонкими нитями геля в один большой агломерат. Внутри него сохраняются T_1 и T_2 , присущие именно фазе геля, и протекает динамика, отличная от динамики окружающего его золя.

Для исследования динамики T_1 и T_2 фаз золя и геля в системе с четкими границами раздела могут быть использованы карты, поскольку обеспечен

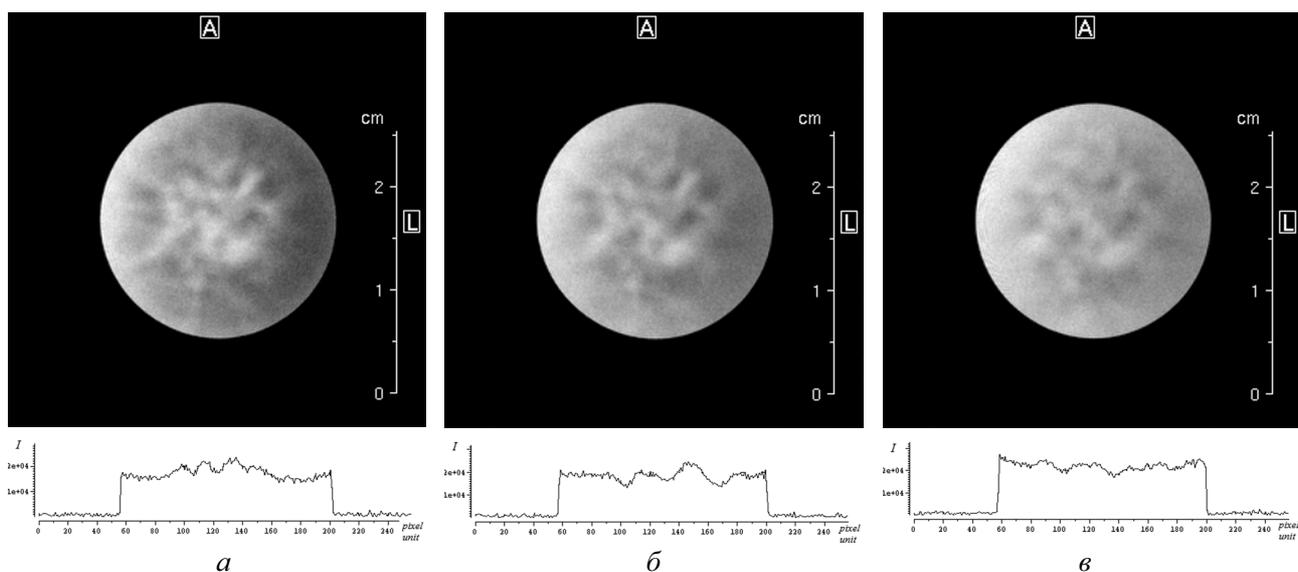


Рис. 4. Последовательность изображений поперечных сечений образца золя (2/0,04) сверху вниз через 1 мм с вертикальными профилями; поле обзора 40 мм, толщина среза 1 мм, 256×256 матрица

необходимый уровень контраста (не достижимый на ранее описанных образцах). На рис. 7 представлены T_1 , T_2 -карты данного образца в процессе старения системы. На картах четко видно, что гель имеет T_1 , T_2 меньше, чем окружающий его золю. Но с течением времени T_1 золя падает, а геля — возрастает (согласно графикам на рис. 2), вследствие чего контраст постепенно исчезает (на T_2 -карте контраст сохраняется, т.к. T_2 геля тоже падает).

Вновь T_1 контраст, но уже обратный, появляется только после гелирования золя и начала процесса его высыхания.

Описанное явление входит в раздел задач ЯМР томографии, которые являются стандартными для данного метода. Легко устанавливается морфология фаз, идентифицируется граница раздела, а также наблюдается динамика процессов, протекающих независимо в каждой фазе системы.

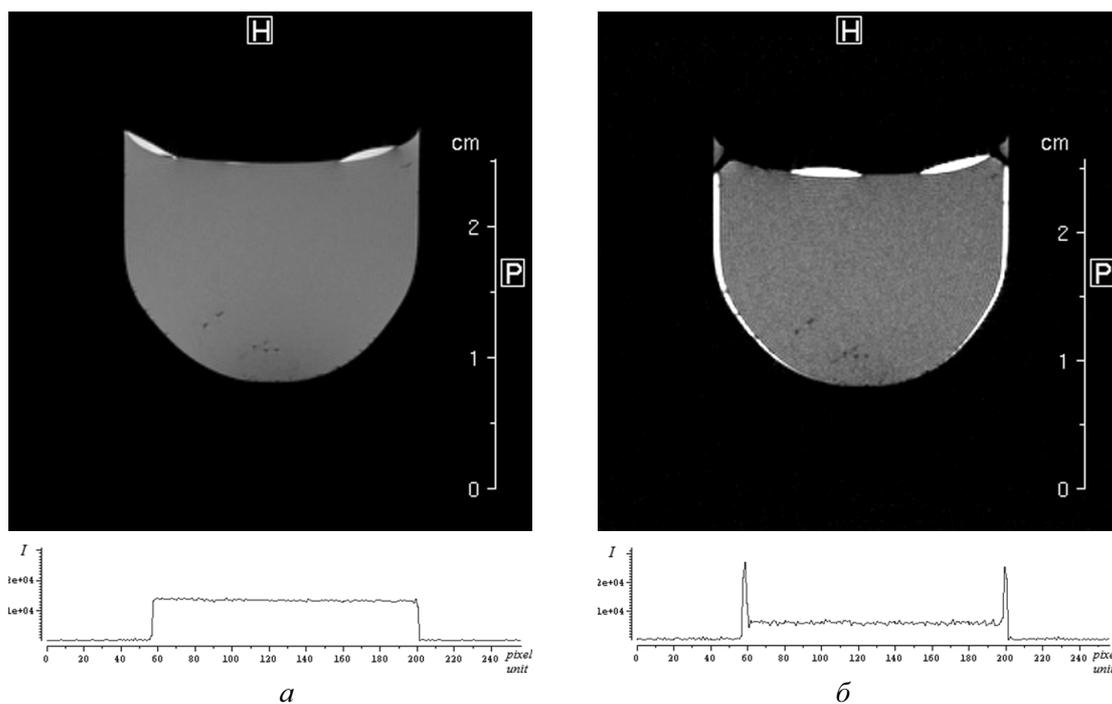


Рис. 5. Изображения центральных продольных сечений геля (с интервалом в 20 ч) в процессе синерезиса, с горизонтальными профилями; поле обзора 40 мм, толщина среза 1 мм, 256×256 матрица

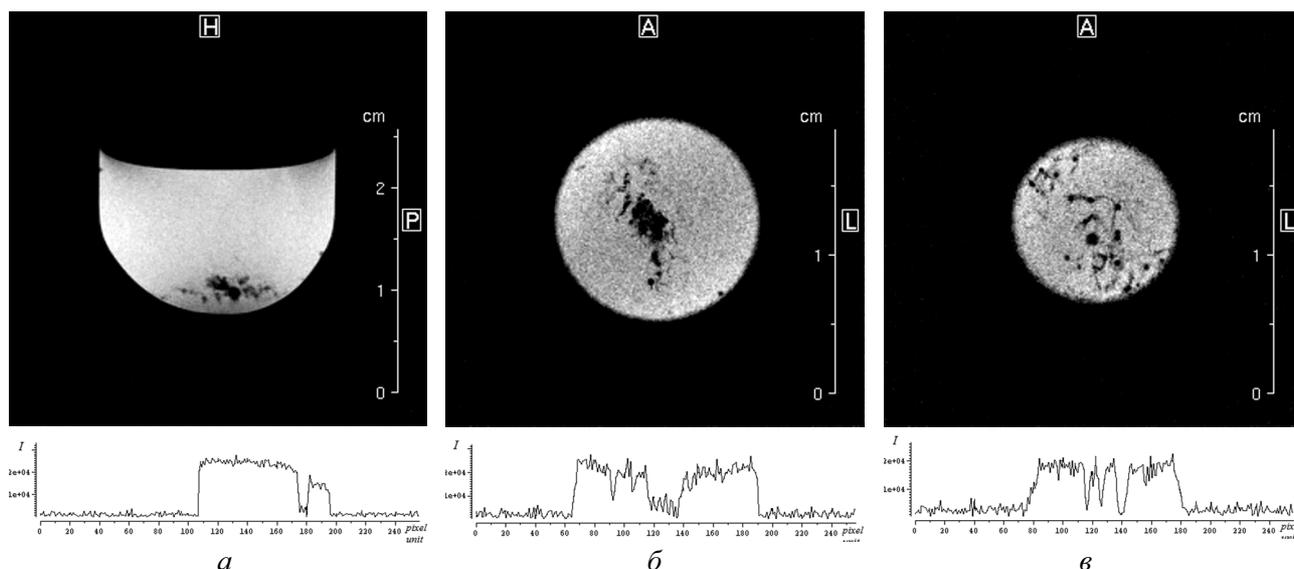


Рис. 6. Изображения продольного сечения (а), поперечных сечений (б, в) через 0,5 мм сверху вниз с вертикальными профилями; 256×256 матрица, а — поле обзора 40 мм, толщина среза 1 мм; б, в — поле обзора 30 мм, толщина среза 0.5 мм

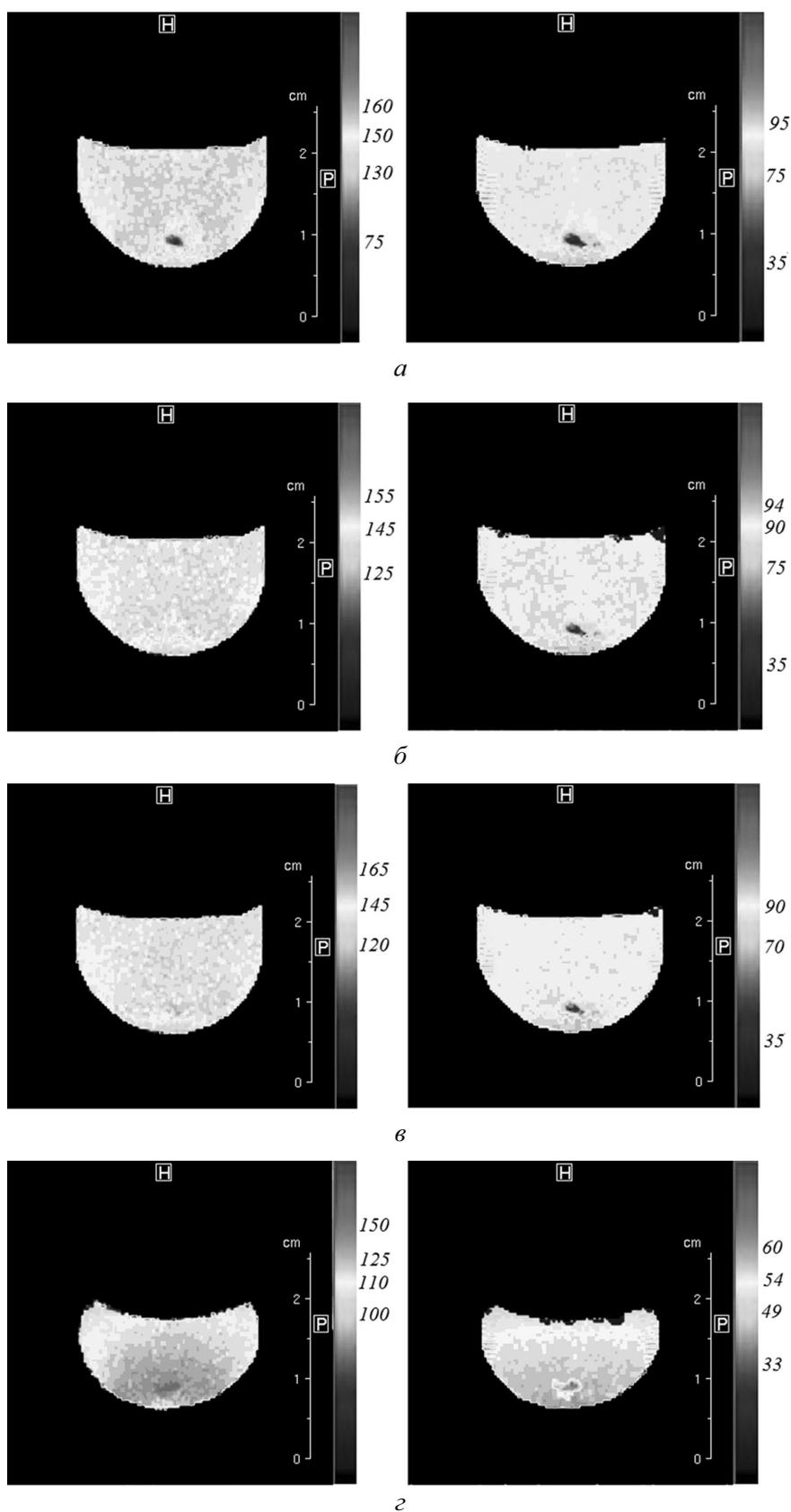


Рис. 7. T_1 , T_2 -карты (слева — T_1 , справа — T_2 , мс) центрального продольного сечения образца в процессе старения; поле обзора 40 мм, толщина среза 1 мм, 128×128 матрица; *a* — 15 мин после приготовления, *б* — 50 мин, *в* — 2,5 ч, *г* — 3 сут.

ВЫВОДЫ

В работе впервые представлены результаты ЯМР томографического исследования гидрозоля кремнезема, полученного из жидкого стекла, на ранних стадиях процесса гелеобразования. Исследована динамика времен ядерной магнитной релаксации в процессе гелеобразования при различных концентрациях растворенного кремнезема. Обнаружена зависимость динамики T_1 от свойств образующегося геля. Результаты томографического исследования демонстрируют сложный пространственный характер протекающих процессов, согласующийся с современной теорией золь-гель перехода. С помощью модельных систем продемонстрирована актуальность задачи визуализации фаз с размытыми границами и процессов, протекающих в сложных коллоидных системах. При этом показана возможность классического применения ЯМР томографии при возникновении задач, связанных с исследованием четких межфазных границ.

В заключение авторы работы выражают благодарность д.х.н., профессору В. Ф. Павлову за активное участие в обсуждении результатов. Работа была выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du J., Bydder M., Takahashi A. M., et al. // Magn. Reson. Imaging. 2011. V. 29. P. 470—482.
2. Rallabandi V. P. S., Roy P. K. // Magn. Reson. Imaging. 2010. V. 28. P. 1361—1373.
3. Al-Manea A., El-Zaart A. // IFMBE Proceedings. 2007. V. 15. P. 255—258.
4. Jakob P. M., Haase A. // Magn. Reson. in Medicine. 1992. V. 24. № 2. P. 391—396.
5. Мэнсфилд П. // УФН. 2005. Т. 175. Вып. 10. С. 1044—1052.
6. Prasad P. V. Magnetic Resonance Imaging. Methods and Biologic Applications. New Jersey. Totowa, 2006. 447 p.
7. Stapf S., Han H. S.-I. NMR Imaging in Chemical Engineering. Weinheim, 2006. 560 p.
8. Коптюг И. В., Сагдеев Р. З. // Успехи химии. 2002. Т. 71. Вып. 7. С. 673—699.
9. Cody G. D., Botto R. E. // Energy & Fuels. 1993. V. 7. P. 561—562.
10. Cody G. D., Botto R. E. // Macromolecules. 1994. V. 27. P. 2607—2614.
11. Balcom B. J., Barrita J. C., Choi C., et al. // Materials and Structures. 2003. V. 36. P. 166—182.
12. Jayasundar R., Ayyar S., Raghunathan P. // Magn. Reson. Imaging. 1997. V. 15. №. 6. P. 709—717.
13. Tashiro M., Ishida N., Shimotakahara S., et al. // Analytical Sciences. 2003. V. 19. P. 933—936.
14. Duce S., Morrison F., Welten M., et al. // Magn. Reson. Imaging. 2011. V. 29. №.1. P. 132—139.
15. Морозов Е. В. // Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск, 2008. С. 211—212.
16. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. 809 с.
17. Шабанова Н. А., Попов В. В., Саркисов П. Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. Академическая книга, 2007. 309 с.
18. Денискина Н. Д., Калинин Д. В., Казанцева Л. К. Благородные опалы. М.: Наука, 1987.
19. Gary L. W., de Jong B. H. W. S., Walter Jr. E. D. // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1982. V. 46. №. 7. P. 1317—1320.
20. Kinrade S. D., Swaddle Th. W. // Inorg. Chem. 1988. V. 27. №. 23. P. 4253—4259.
21. Kinrade S. D., Swaddle Th. W. // Inorg. Chem. 1988. V. 27. №. 23. P. 4259—4264.
22. Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. Академическая книга, 2004. 280 с.
23. Morozov E. V., Shabanova O. V., Pavlov V. F., et al. // Magnetic Resonance in Solids. EJ. 2010. V. 12. №. 1. P. 1—6.
24. Callaghan P. Principles of nuclear magnetic resonance microscopy. Oxford, 1991.
25. Bernstein M. A., King K. F., Zhou X. J. Handbook of MRI pulse sequences. Elsevier Academic Press, 2004. 1040 p.
26. Ринк П. А. Магнитный резонанс в медицине. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003. 248 с.
27. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пена и пенные пленки. Химия, 1990. 432 с.

Морозов Евгений Владимирович — инженер, специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН; аспирант, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; тел.: (391) 2498561, (908) 2038088, e-mail: morozov_if@mail.ru

Morozov Evgenie V. — engineer, Special Designing and Technological Bureau “Nauka” KSC SB RAS; post-graduate student, Kirensky Institute of Physics SB RAS; tel.: (391) 2498561, (908) 2038088, e-mail: morozov_if@mail.ru

Шабанова Ольга Вильгельмовна — инженер, специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН; тел.: (913) 5790414, e-mail: ollach@yandex.ru

Фалалеев Олег Владимирович — к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Красноярский научный центр СО РАН; тел.: (391) 2498561, e-mail: falaleev_ov@mail.ru

Shabanova Olga V. — engineer, Special Designing and Technological Bureau “Nauka” KSC SB RAS; tel.: (913) 5790414, e-mail: ollach@yandex.ru

Falaleev Oleg V. — PhD (physical and mathematical science), senior scientific employee, Krasnoyarsk Scientific Centre SB RAS; tel.: (391) 2498561, e-mail: falaleev_ov@mail.ru