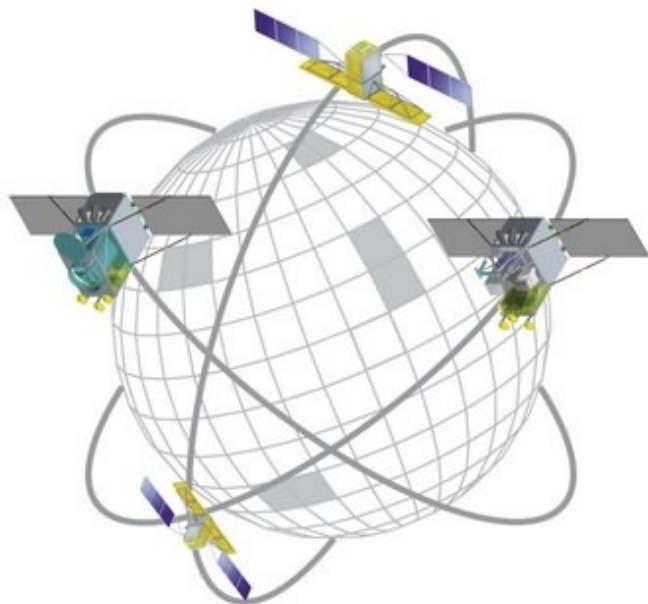




Группа Поиск и Севастопольский государственный университет



Инновационная технология дистанционного поиска полезных ископаемых

Основные научные положения

Метод ядерно-магнитного резонанса в дистанционном зондировании Земли с целью поиска полезных ископаемых

1. Физические принципы и формирование аномалий

Базовые физические принципы, позволяющие реализовать эффект ядерно-магнитного резонансного поиска минералов на практике, относятся к эффекту Кирлиан, а также к эффекту энергоинформационного переноса излучения конкретного вещества с помощью несущей частоты. Мы используем вышеупомянутые физические принципы и эффекты при выполнении дистанционных поисков полезных ископаемых с помощью технологии «Поиск»

Научные предпосылки

В физике атомного ядра уделяется особенное внимание магнитным и электрическим моментам. В соответствии с работами академика Е.Завадского (1946), все ядра с ненулевыми спинами имеют магнитный момент μ_1 , связанный со спином этого ядра J , ядерным магнетонном — μ_{nucl} и пропорционален гиромагнитному отношению — γ :

$$\mu_1 = \gamma \bullet J \bullet \mu_{\text{nucl}};$$

Гиромагнитное отношение γ есть постоянная магнитуда и равна отношению ядерного магнитного момента к ядерному угловому моменту. Если внести атомное ядро со спином J и моментом μ_1 в магнитное поле интенсивностью I , то мы можем видеть магнитное взаимодействие, и энергия взаимодействия магнитного момента ядра с полем W_m будет пропорциональна H :

$$W_m = \mu_1 \bullet H \bullet (m/J);$$

где m есть проекция вектора J на направление интенсивности магнитного поля.

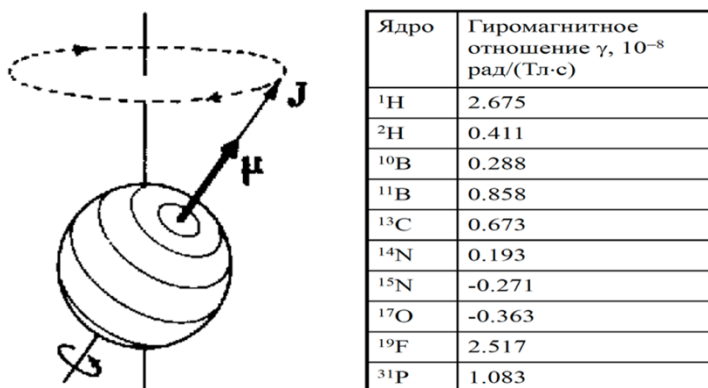


Рис.1. Примеры параметров ядер

То есть, энергия взаимодействия пропорциональна интенсивности магнитного поля. В соответствии с квантовым механизмом, некоторые энергетические (квантовые) уровни ядерной энергии возможны, и разность в значениях 2 соседних энергетических уровней будет равна:

$$\Delta W_m = \gamma \cdot \mu_{\text{nucl}} \cdot H;$$

Тогда частота, соответствующая этой энергии (называемая ларморовой частотой), будет:

$$f_L = \Delta W_m / h;$$

где h – постоянная Планка.

Если поместить образец вещества в постоянно ориентированное магнитное поле I (спины будут ориентированы вдоль магнитного поля) и одновременно подать изменяющееся вращающееся магнитное поле I_{var} , но перпендикулярно ориентации ядер в поле I , тогда при частоте переменного поля, равной ларморовой частоте f_L , можно наблюдать резонансное поглощение и резонансное рассеивание энергии образцом вещества.

Как правило, величины ларморовых частот для различных веществ в магнитном поле Земли лежат в терагерцовом диапазоне (100 ГГц – 100 ТГц).

ядро	природное содержание, %	чувствительность		спин	диапазон химических сдвигов, м.д.	стандарт	ларморова частота (МГц) при $B_0=7.05$ Тл
		относительная	абсолютная				
^1H	99.98	1.00	1.00	$\frac{1}{2}$	18..-1	SiMe_4 (TMS)	300.0
^2D	0.015	$9.65 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-6}$	1	18..-1	$\text{SiMe}_4\text{-}d_{12}$	46.05
^{11}B	80.42	0.17	0.13	$\frac{3}{2}$	100..-120	$\text{BF}_3 \cdot \text{Et}_2\text{O}$	96.25
^{13}C	1.108	$1.59 \cdot 10^{-2}$	$1.76 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	240..-10	SiMe_4 (TMS)	75.43
^{14}N	99.63	$1.01 \cdot 10^{-3}$	$1.01 \cdot 10^{-3}$	1	1200..-500	MeNO_2	21.67
^{15}N	0.37	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$3.85 \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{2}$	1200..-500	MeNO_2	30.40
^{17}O	0.037	$2.91 \cdot 10^{-2}$	$1.08 \cdot 10^{-5}$	$\frac{5}{2}$	1400..-100	H_2O	40.67
^{19}F	100.0	0.83	0.83	$\frac{1}{2}$	100..-300	CFCl_3	282.23
^{29}Si	4.70	$7.84 \cdot 10^{-3}$	$3.69 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{2}$	100..-400	SiMe_4 (TMS)	59.60
^{31}P	100.0	$6.63 \cdot 10^{-2}$	$6.63 \cdot 10^{-2}$	$\frac{1}{2}$	230..-200	H_3PO_4	121.44

Табл. 1. Некоторые магнитно-активные ядра

Если ядро, обладающее спином, находится в молекуле, то электроны, движущиеся вокруг него или других соседних ядер, создают вблизи него дополнительное магнитное поле, которое смещает ларморовскую частоту, поскольку эффективное магнитное поле (называемое *локальным*), в котором находится ядро из-за присутствия рядом электронов, отличается от приложенного внешнего магнитного

поля, и таким образом формируется химический сдвиг. Для анализа многих органических и элементоорганических веществ используется метод ядерно-магнитного резонанса, который основан на измерении химических смещений ядер с полуцелым спином. При помощи метода ядерного магнитного резонанса можно получить данные о химическом строении молекул, их пространственной структуре и молекулярной динамике

Таким образом, имея записанные резонансные частоты для каждого вещества в условиях ядерного магнитного резонанса возможно судить о наличии искомого вещества в глубинах земли. Визуализация границ аномалий, связанных с залежами полезных ископаемых, выполняется с помощью специальной обработки спутниковых снимков в полях излучений и их интерпретации во вращающемся магнитном поле (эффект Кирлиана).

2. Теоретические основы поиска и оконтуривания скоплений полезных ископаемых методом ЯМР

Залежи полезных ископаемых, подземных вод и тд, породы перекрывающего комплекса и ландшафт тесно связаны друг с другом и оказывают влияние друг на друга. Влияние залежей полезных ископаемых на перекрывающие породы и ландшафт находит свое отражение в многоспектральных снимках земной поверхности.

Ниже приведены модели на примере залежей углеводородов (УВ), формирующие признаки наличия этих скоплений в различных спектральных областях.

Физико-химическая модель

Под воздействием комплекса генетических аномальных полей, генерируемых залежами УВ, например, породы перекрывающего комплекса вплоть до дневной поверхности претерпевают определенное изменение минерального состава, которое может регистрироваться дистанционно. Влияние диффузивно-фильтрационного потока УВ из залежей приводит к существенной трансформации химизма почвенного покрова, выражавшейся в возникновении специфической геохимической обстановки в приповерхностной зоне месторождения. Над месторождениями нефти и газа, происходит, в том числе, формирование сульфидной минерализации и битумизация поверхностных отложений, обнаружены аномальные поля концентраций гелия, U,

Th, Cu, Ni, V, Co, Fe, Si. Причем все эти изменения локализуются в зонах аномально низких напряжений и разуплотнения пород, формирующихся над месторождениями. Важнейшее значение при формировании в поверхностных отложениях минералогических аномалий, определяющих цвет и, следовательно, оптические свойства пород, имеет окислительно-восстановительная обстановка, определяемая кислотно-щелочными растворами pH и окислительно-восстановительным потенциалом Eh.

Следы мигрирующих УВ обнаруживаются над залежами нефти и газа: в породах и грунтах, подземных и поверхностных водах, снежном покрове, почвенной и приземной атмосфере, микрофлоре и растениях. Таким образом, практически все природные среды, заполняющие в неразрывном единстве пространство вокруг залежей, несут определенную информацию о наличии на глубине скоплений нефти и газа. В цепи этих объектов выделяется важное звено - растительность, связывающая лито-, гидро- и атмосферу, чутко реагирующая на геохимические особенности среды обитания. Миграция УВ и неуглеводородных компонентов по субвертикальным зонам, вплоть до дневной поверхности, является внеландшафтным фактором, способствующим возникновению в приповерхностной зоне и поверхностных компонентах ландшафта геохимической обстановки, приводящей к интенсивному перераспределению и накоплению в растительном покрове определенного ряда химических элементов. Установлено, что нафтидогенные факторы контролируют от 12 до 16% изменчивости химического состава доминирующих видов растений. Нафтидогенное воздействие на оптические характеристики растительности, как правило, осуществляется через изменения концентрации и состава хлорофилла, наиболее чувствительного к токсическому воздействию.

Лиственная растительность, подвергаясь геохимическому воздействию, отличается не только инфракрасным спектром отражения, но и тем, что она раньше приобретает осеннюю окраску.

Процессы, происходящие в осадочном чехле, а также в почвенно-растительном покрове как индикаторе глубинного строения, не могут не оказывать определенного влияния на состояние приземной атмосферы. Такое влияние необходимо рассматривать в русле глобальной концепции "жидко-газоворудного дыхания" Земли.

Эпигенетические газы могут мигрировать в атмосферу либо путем непосредственной фильтрации из глубоководных горизонтов осадочного чехла и фундамента по

разрывным нарушениям и зонам повышенной проницаемости, либо посредством вторичной дегазации поверхностных отложений, ранее захвативших диффундирующие флюиды. Большая часть углеводородных газов на путях восстающей миграции, однако, связывается в породах перекрывающего комплекса в сложные органические соединения. Восходящий поток мигрирующих УВ над залежами нефти и газа - один из основных источников поступления метана и более тяжелых углеводородов в атмосферу.

Таким образом, над месторождениями нефти и газа в приземном воздухе наблюдаются аномальные концентрации углеводородных газов и УВ-окисляющих микроорганизмов, а также, по некоторым данным, органического аэрозоля. Часть солнечного излучения, рассеиваемая на этих молекулах и частицах и регистрируемая на изображении, может, следовательно, нести определенную информацию о нефтегазоносности территории.

Тепловая модель

К земной поверхности навстречу друг к другу устремлены два потока, солнечный и глубинный (из недр Земли). Результат есть некая сумма высокочастотных и низкочастотных составляющих, причем на глубине нескольких сантиметров отсутствуют суточные колебания, а на глубине ≈ 20 метров - годовые. Экспериментальные данные по различным нефтегазоносным регионам подтверждают существование связи между аномалиями температур приповерхностных отложений и залежами УВ, а также тектоническими нарушениями. Тепловой поток из недр вдоль разломных и трещиноватых зон имеет как правило положительное значение.

3. Формирование аномалий

Физические поля

Вся окружающая природа и все ее элементы находятся в энергетическом состоянии материи, то есть, существуют в постоянном воздействии физических полей Земли. Физические поля имеют широкий диапазон, от гравитационного поля Земли до внутриатомных сил, и, следовательно, обладают различным дальностью действия. По своей природе различают шесть видов физических полей: магнитное, гравитационное, тепловое, электрическое, сейсмическое и радиоактивное. Наряду с указанными естественными (пассивными) полями Земли, человек создает для

различных технических и исследовательских нужд аналогичные поля искусственного происхождения (активные).

Физические поля имеют различную природу возникновения и распространения, и обусловлены различными процессами, происходящими как в недрах Земли, так и за ее пределами. Эти поля являются основными источниками информации о глубинном строении Земли и происходящих в ней процессах. Информация передается от источников (например, залежи полезных ископаемых) на поверхность Земли дистанционным путем. Эффект того или иного поля определяется физическими свойствами возмущающих пород, дальностью действия поля и особенностями среды. Эти принципы положены в основу всех методов изучения как самой Земли, так и методов поиска и разведки полезных ископаемых.

Различные, например, вторичные (эпигенетические) процессы превращают залежь полезных ископаемых в особый объект. Его параметры (например, температура, поляризуемость, сопротивление и тд) резко отличаются соответствующих параметров вмещающих пород. Например, залежи УВ образуют природные гальванические элементы, которые наблюдаются на земной поверхности в виде аномалий естественного электрического поля. Природными электродами гальванического элемента служат зоны сульфидной минерализации. Границы аномалий, как правило, вписываются в контуры месторождений, что подтверждено большим количеством опытно-промышленных работ.

Одним из факторов проявления залежи полезных ископаемых в геофизических полях является то, что она формирует совокупность аномальных геофизических эффектов уже на стадии своего образования. Например, вследствие заполнения ловушки УВ изменяются геофизические параметры геологической среды. Это изменение связано, в частности, с мощностью пласта коллектора, пористостью и проницаемостью его пород, составом нефти, распределением напряжений на границах раздела пород и контактов флюида и тд.

Физически залежь полезных ископаемых представляет собой аномальную энергетическую зону с уравновешенным состоянием составляющих ее элементов. Соответственно, какое-либо внешнее воздействие (вмешательство в это состояние), например, магнитного поля Земли, приведет к его изменению. Таким образом, посредством создания такого неравновесного состояния в геологической системе залежь - вмещающие породы можно получить индивидуальный (характерный только для данного типа полезного ископаемого) отклик залежи в геофизическом поле, что

и позволяет идентифицировать ее посредством специальных дистанционных методов поиска.

Образование температурных аномалий над залежами УВ

Локализация возможных скоплений УВ методами дистанционного зондирования включает, в том числе дешифрирование снимков в инфракрасном диапазоне температуры. Отражение нефтегазоносных структур в геотермических аномалиях во многом связано с тектонической активностью. Для участков интенсивного тепломассопереноса характерны положительные поверхностные температурные аномалии, которые зачастую приурочены к зонам тектонически активных разломов. Под влиянием геостатического и эндогенного факторов происходит вертикальная миграция УВ флюидов. Общий умеренный подъём территории (благоприятный для вертикальной миграции) ведёт к высвобождению флюидов из осадочных пород за счёт уменьшения геостатического давления. Относительно разнонаправленные движения блоков по системе разломов и коровых разрывов в процессе их неотектонической активизации ведут к их "раскрытию" (увеличение количества трещин) и интенсификации подтока УВ флюидов с глубины (интенсивный тепломассоперенос). Локальные конвективные потоки вод глубинного формирования, содержащие УВ флюиды, поднимаются вверх по гидродинамически ослабленным зонам тектонических нарушений. Интенсивная вертикальная миграция УВ приводит к образованию их скоплений под экранирующими породами (при наличии ловушки и уменьшении скорости фильтрации).

Температурные аномалии фиксируются в определенных зонах спектра отражения от земной поверхности многозональных космических снимков и используются при космогеологических исследованиях территории. Учитывая, что значение температурных аномалий на земной поверхности над нефтегазовыми месторождениями не превышает первых градусов (иногда десятых долей градуса) в качестве дешифрируемого признака нефтегазоносных участков используется контрастная характеристика нефтегазоносной структуры, которая основана на отношении показателей яркости тона контурной (внутри контура месторождения) и вне контурной (прилегающей к контуру нефтегазоносности месторождения) областей изображения теплового диапазона электромагнитного спектра (3,5-12,8 мкм).

4. Механизм энергоинформационного переноса

Эффект энергоинформационного переноса излучения вещества с помощью несущей частоты — это концепция, связанная с передачей структурных и функциональных характеристик вещества через волновые процессы с использованием несущей частоты. Суть явления заключается в формировании в окружающем веществе индивидуального «волнового (спектрального) портрета», который отражает особенности его излучательной способности. Этот «портрет» может передаваться на другие объекты или носители. В качестве несущей частоты в технологии ЯМР используется магнитное поле Земли. Таким образом обеспечивается отсутствие затухания и сохранение спектральных характеристик изучаемого вещества (залежи УВ, рудного тела и т.д.)

Механизм процесса

В стационарном состоянии вещество находится в динамическом равновесии с полем излучения: оно постоянно поглощает часть падающего излучения и переизлучает его. При этом любой структурный элемент вещества оставляет в поле излучений свой след — оставляет след в виде изменений амплитуды, частоты, фазы, поляризации и других параметров волны.

Таким образом, в поле излучений формируется индивидуальный для каждого вещества спектр частот, который отражает его особенности как излучателя. Перенос этого спектрального портрета и составляет суть энергоинформационного обмена.

Особенности механизма энергоинформационного переноса

Процесс энергоинформационного переноса характеризуется следующими основными особенностями

- Избирательный (адресный) характер. В резонансном взаимодействии участвуют только те объекты или частицы, которые объединены одной и той же волной. Это ограничивает круг объектов, участвующих в процессе.
- Дальнодействие. В отличие от изотропного излучения, плотность которого падает пропорционально квадрату расстояния, излучение, передаваемое по резонансной волне, ослабевает только из-за диссипации.
- Несущая частота. Несущую частоту обеспечивает магнитное поле Земли

Перенос излучением индивидуальных свойств веществ (по материалам публикации д.т.н., проф. Эткина В.)

Известно, что падающее на тело излучение частично отражается его поверхностными слоями, частично поглощается им, и частично проходит сквозь тело, не взаимодействуя с ним. Следовательно, в стационарном состоянии вещество находится в динамическом равновесии с полем излучения, т.е. постоянно переизлучает поглощенное его поверхностными и глубинными слоями излучение. Понимание специфики этого процесса существенно облегчается, если отказаться от существующего представления об излучении как следствии «перескока» электрона с одной орбиты на нижележащую, и рассматривать этот процесс как следствие энергообмена вещества с излучением. Известно, что энергия атома остается неизменной, если движение электронов в нем происходит только под действием внутренних (центральных) сил, исходящих из ядра атома и удерживающих их на орбите. Следовательно, излучение веществом энергии возникает только в том случае, когда на его атомы действуют сторонние (нецентральные) силы F , исходящие от окружающей его среды. Это требует рассмотрения в качестве объекта исследования не одиночного атома, а «расширенной» системы, включающей в себя и вещество, и излучение.

Если в какой-либо момент времени исходящая из поля излучений сила F «сонаправлена» со скоростью v электрона или какой-либо другой структурной составляющей вещества (т.е. $F \cdot v > 0$), то возникает его ускорение, которое заканчивается, когда $F \cdot v = 0$. Если же $F \cdot v < 0$, электроны испытывают кратковременное торможение, длительность которого определяется отрицательным полупериодом взаимодействующей с электроном волны. При этом возникает возмущение поля излучений, которое распространяется в нем в виде волны, модулированной возмущающим сигналом. Такие возмущения следуют друг за другом через промежуток времени между состояниями атомов вещества, при которых $F \cdot v = 0$. Ввиду того, что процесс торможения или ускорения электронов кратковременен, сопровождающий его процесс излучения и поглощения атомами энергии волн также приобретает дискретный характер, что вовсе не противоречит классической механике.

Принципиально важно, что в таком случае прямая и обратная волна будут отличаться по некоторым своим характеристикам друг от друга, поскольку последняя в отличие от первой окажется модулированной колебаниями

участвующих во взаимодействии структурных элементов атома. Действительно, лучистый энергообмен между полем излучения и телом на любой частоте ν прекращается при обращении движущей силы этого процесса в нуль, т.е. при равенстве потенциала прямой ψ_v' и обратной ψ_v'' волны соответствующей частоты. Такое равновесие носит динамический характер и нарушается всякий раз, когда изменяется амплитуда, частота, фаза, плоскость поляризации, шаг «закрутки» и другие параметры волны, соответствующей данному структурному элементу вещества. Это может произойти на любой из гармоник. В таком случае и возникает модуляция несущей волны. А поскольку поле излучений колеблется в неограниченном диапазоне частот, любой структурный элемент вещества оставит в поле излучений свой след.

Таким образом, в поле излучений, окружающем вещество, формируется индивидуальный «волновой (спектральный) портрет» вещества с присущими его элементам частотами, амплитудами, фазами и поляризацией. Перенос этого «волнового (спектрального) портрета» и составляет суть так называемого «энергоинформационного обмена».

5. Спектральные свойства некоторых минералов, используемые в технологии «Поиск» при локализации рудных объектов

Данные спутниковой съемки в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм видимого, ближнего инфракрасного (VNIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) спектральных диапазонов являются диагностическими при минералогическом и литологическом картировании в различных климатических и тектонических условиях.

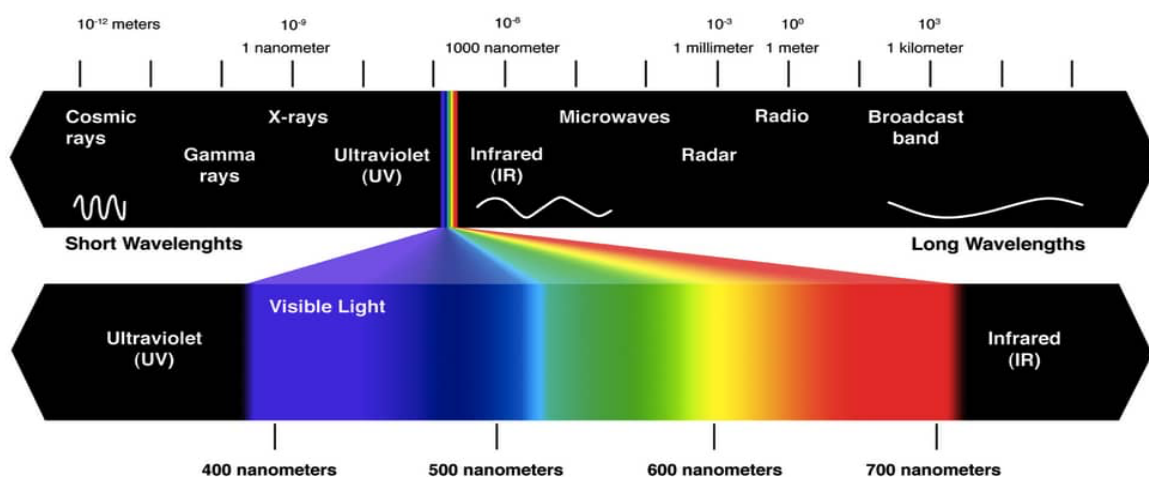


Рис. 2. Диапазон электромагнитного излучения

Из-за отличительной особенности спектрального поглощения многие минералы и горные породы различимы по их спектральным образам. Таким образом, например, гидротермально измененные и неизмененные породы могут быть выделены и нанесены на карту с помощью диагностических сигнатур в диапазонах VNIR и SWIR.

Type	Silicate structure	Mineral group	Example	VNIR response	SWIR response	LWIR response
Silicates	Inosilicates	Amphibole	Actinolite	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Pyroxene	Diopside	Good	Moderate	Good
	Cyclosilicates	Tourmaline	Elbaite	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Nesosilicates	Garnet	Grossular	Moderate	Non-diagnostic	Good
		Olivine	Forsterite	Good	Non-diagnostic	Good
	Sorosilicates	Epidote	Epidote	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Phyllosilicates	Mica	Muscovite	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Chlorite	Clinocllore	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Clay minerals	Illite	Non-diagnostic	Good	Moderate
			Kaolinite	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Tectosilicates	Feldspar	Orthoclase	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
			Albite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
		Silica	Quartz	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
Non-silicates	Carbonates	Calcite	Calcite	Non-diagnostic	Moderate	Good
		Dolomite	Dolomite	Non-diagnostic	Moderate	Good
	Hydroxides		Gibbsite	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Sulphates	Alunite	Alunite	Moderate	Good	Moderate
			Gypsum	Non-diagnostic	Good	Good
	Borates		Borax	Non-diagnostic	Moderate	TBD
	Halides	Chlorides	Halite	Non-diagnostic	TBD	TBD
	Phosphates	Apatite	Apatite	Moderate	Non-diagnostic	Good
	Hydrocarbons		Bitumen	TBD	Moderate	TBD
	Oxides	Hematite	Hematite	Good	Non-diagnostic	Non-diagnostic
		Spinel	Chromite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Non-diagnostic
	Sulphides		Pyrite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Non-diagnostic

Рис. 3. Качественная точность спектрального анализа в диапазонах VNIR, SWIR и LWIR

Оксиды и гидроксиды железа, включая гематит, ярозит, лимонит и гетит, демонстрируют отчетливое спектральное поглощение в диапазоне VNIR от 0,4 до 1,1 мкм. Оксиды железа и гидроксидные минералы в основном образуются в ходе процессов гидротермального изменения, связанных с различными рудными телами, такими как месторождения порфировой меди. Гидроксил-содержащие минералы, такие как биотиты, глинистые минералы, сульфаты, карбонатные группы, демонстрируют отчетливое спектральное поглощение в диапазоне SWIR. Различные минералы, включая минералы, содержащие Al-Si-(OH) и Mg-Si-(OH), такие как глинистые минералы, тальк и хлорит, и содержащие Ca-Al-Si-(OH) соросиликатные минералы, такие как эпидот и сульфаты, содержащие OH, такие как алунит и гипс, карбонаты имеют диагностические спектральные характеристики в диапазоне SWIR.

Из-за внутренней структуры кварцевого минерала он показывает сигнатуру поглощения от 8,3 до 9,1.

Спектральные характеристики некоторых гидротермальных минералов представлены на рис. 4(a) и 4(b). Рисунок 4(a) отражает особенности поглощения минералов Al-O-H, Mg-O-H, алуниита и карбонатов в области SWIR, тогда как на рисунке 4(b) показаны особенности спектров оксидов и гидроксидов Fe. Эти минералы в основном связаны с различными гидротермальными изменениями вокруг различных рудных месторождений.

Таким образом, спектральные характеристики минералов, которые являются одним из наиболее важных аспектов гиперспектрального дистанционного зондирования, могут быть использованы для литологического и минерального картирования, а также для разведки руд.

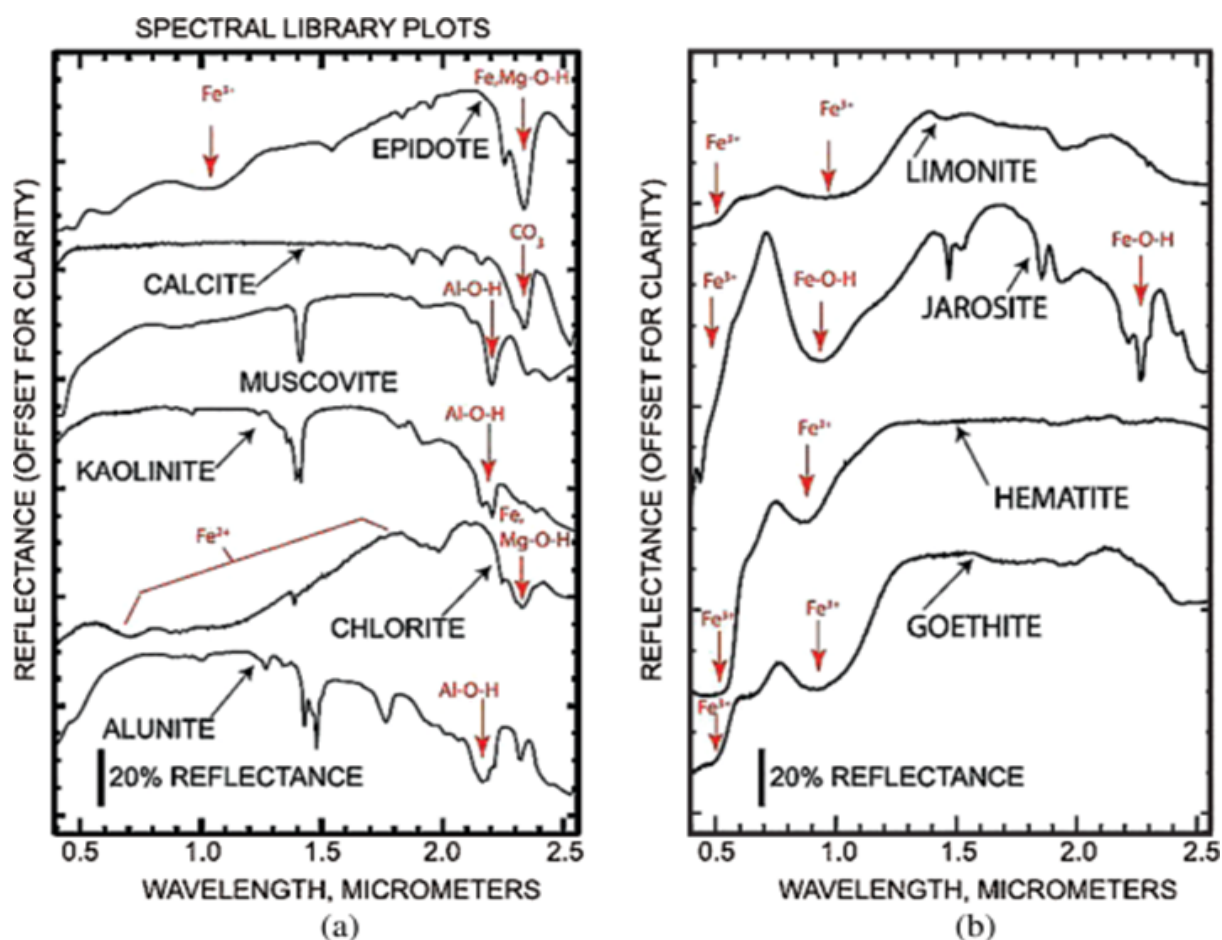


Рис. 4. Лабораторные спектральные характеристики различных гидротермальных минералов, включая (a) глинистые минералы и (б) оксиды железа.

Существует несколько хорошо изученных спектральных библиотек минералов и горных пород, таких как библиотека Геологической службы США (USGS),

Университета Джона Хопкинса (JHU) и Лаборатории реактивного движения (JPL), Спектральная библиотека излучения и отражения (EARSL) и спектральная библиотека Национальной коллекции минералов (NMC). Геологическая служба США предоставляет спектральную библиотеку минералов и горных пород для диапазона 0,35 - 2.5 мкм. Спектральная библиотека JHU охватывает диапазон 2 - 25 мкм. Спектральная библиотека NASA JPL включает минералы характеристиками спектра 0,4 - 2.5 мкм. Совет Организации прикладных исследований Австралии разработал библиотеку различных минералов EARSL. NMC, подготовленный Геологической службой Канады, содержит более 100 000 минералов.

Хотя спектральные библиотеки различных минералов, полученные в лабораториях, широко использовались для идентификации минералов и горных пород, некоторые естественные неоднородности, существующие в различных минералах, и связанное с ними спектральное смешение, возможно, все еще оказывают нежелательное влияние на результаты обработки изображений.

6. Эффективность технологии для различных видов полезных ископаемых

Углеводороды

Основной экономический эффект от внедрения метода обеспечивается сокращением объемов сейсморазведочных и буровых работ, которые необходимы для выявления месторождений. При поисках нефтяных месторождений в известных нефтегазоносных провинциях, согласно статистическим данным может буриться до нескольких десятков «сухих» скважин. Например, крупные месторождения нефти в Северном море были обнаружены после бурения 200 скважин; крупнейшее в Северной Америке нефтяное месторождение Prudhoe Bay с извлекаемыми запасами нефти около 2 млрд. т было обнаружено после бурения 46 поисково-разведочных скважин. Если принять тот факт, что для открытия среднестатистического месторождения на континентальной части требуется пробурить до 3-х скважин (при средней глубине 2,5 км), то минимальные затраты на буровые работы в России составят не менее 7 млн.\$.

Применение технологии ЯМР Группы Поиск позволит свести к минимуму вероятность бурения «сухих» скважин, что обеспечит экономию (экономический эффект) от ее применения не менее 4,5 млн.\$ при выявлении

одного месторождения. Еще больший экономический эффект обеспечивается использованием метода ЯМР при проведении работ на шельфе, так как стоимость буровых работ в несколько раз выше, чем на континенте.

Результатом применения метода ЯМР, как неотъемлемой части комплекса геологоразведочных работ (ГРР), является не только снижение затрат на сейсморазведочные и буровые работы, но и повышение информативности всего процесса ГРР. В этом случае повышается надежность оценки ресурсной базы УВ, что обеспечивает снижение рисков и неопределённостей, а также дает надежный технико-экономический инструмент для принятия решения по дальнейшим работам на изучаемом объекте.

Помимо экономического эффекта от снижения затрат на сейсморазведочные и буровые работы, не меньшее значение имеет существенное сокращение сроков ГРР, поскольку выявление месторождений УВ можно проводить за счет малозатратного (по сравнению с сейсморазведочными и тем более с буровыми работами) высокопроизводительного метода ЯМР, что позволит значительными темпами увеличивать ресурсную базу.

Рудные полезные ископаемые

По аналогии с УВС, возможность применения метода в поисково-разведочных работах на рудные полезные ископаемые (цветные, черные, благородные металлы, металлы редкоземельной группы и т.д) основана на специальной обработке спутниковых снимков и последующей визуализацией аномалий, связанных с залежами этих полезных ископаемых. Как и в случае с УВС технология ЯМР является прямым методом, поскольку может выявлять собственно скопления промышленно ценных минералов с высокой вероятностью и эффективностью.

Высокая разрешающая способность ЯМР является важнейшим конкурентным преимуществом по сравнению с другими методами, поскольку часто рудная минерализация образует незначительные по размерам скопления во вмещающих породах (прожилки, зоны рассеянной вкрапленности), что существенно затрудняет ее локализацию другими методами, то есть, если метод не обладает высокой разрешающей способностью и хорошей точностью, то аномальные свойства рудных минералов осредняются на большой объем пород и оказываются ниже порога чувствительности данного метода, особенно если их содержание невысоко.

Технология ЯМР используется также для выявления рудной минерализации по косвенным признакам. Например, концентрация золота в рудных телах может быть

весьма незначительна (от долей до нескольких десятков грамм на тонну) и в этом случае золоторудная минерализация вряд ли может быть выявлена непосредственно. Вместе с тем золото часто пространственно ассоциирует с другими металлами, например, сульфидами, содержание которых может составлять от первых процентов до десятков процентов, и сульфиды могут быть легко обнаружены с помощью технологии ЯМР. Поэтому выявление участков скопления сульфидов с помощью технологии ЯМР позволяет локализовать участки недр с высокой вероятностью обнаружения в них концентраций золота. Площади и объемы недр, первоочередные для их оценки с помощью горных и буровых работ, сокращаются на порядки, позволяя эффективно распределять инвестиционные средства на геологоразведочные работы.

В качестве приближенной оценки можно взять затраты на геологоразведочные работы месторождений средней группы сложности, где основные капиталовложения приходятся на буровые работы. Объем бурения варьирует от первых сотен до нескольких десятков тысяч погонных метров, что в случае бурения может составлять до 1,7 млн. \$ и более.

Поскольку опосредованно зачастую необходимо большие территории, выявление аномалий для адресной постановки поискового бурения является приоритетной задачей. Однако практически все крупные легко открываемые месторождения уже, как правило, выявлены, и объектом поисков стали так называемые «слепые» залежи, находящиеся в сложных геологических условиях. Здесь метод ЯМР, имеющий беспрецедентную разрешающую способность, глубинность и производительность имеет неоспоримые преимущества перед другими методами. Его экономический эффект определяется в высокой надежности выявления рудопроявлений как на глубине, так и по площади, что выражается в эффективности буровых и иных вскрышных работ и открытия месторождений, а также снижении риска пропуска месторождений.

Нерудные полезные ископаемые

Технология ЯМР широко применяется при поисках и локализации различных нерудных полезных ископаемых. В частности, подтверждена высокая эффективность метода по выявлению угольных месторождений, подземных гидротермальных вод, месторождений алмазов и других ювелирных и поделочных камней и т.д.

Эффективность метода в дегазации угольных шахт

Технология ЯМР позволяет картировать трещины и разломы различного генезиса и параметров, густота и расположение которых являются очень важными факторами как в геологии полезных ископаемых, так и в инженерной геологии. Данная технология ЯМР успешно применяется для выявления разломов и зон скопления метана угольных пластов, что позволяет использовать ее при планировании работ по дегазации угольных шахт и решать вопросы безопасного ведения работ.

7. Алгоритм технологии «Поиск» в приложении к локализации УВ

Технология дистанционного поиска аномалий, объединяющая данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с уникальным методом обработки космических изображений, основана на принципе ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), позволяющая визуализировать границы перспективных аномалий

Технология позволяет выявлять и оконтуривать УВ-аномалии, связанные со скоплениями УВ, проводить оценку глубин залегания УВ, выявлять тектонические разломы, а также осуществлять предварительную оценку ресурсов.

В основе технологии дистанционного выявления УВ-залежей лежат несколько важных физико-химических процессов, происходящих в земной среде:

- Диффузионная миграция летучих УВ и газов из залежи на поверхность грунта. За счёт этих процессов происходит накопление УВ и газов в подповерхностном грунте с последующим формированием ореола рассеяния УВ и различных металлов. Ореолы рассеяния хорошо регистрируются космическими средствами разведки.
- Образование окислов металлов и металлосодержащих минералов за счёт физико-химических процессов и различных химических реакций во вмещающих породах под землей, вызванное скоплениями УВ. Эти процессы создают характерные электромагнитные поля в магнитном поле Земли и приводят к изменению магнитных свойств земной среды, которые возможно регистрировать в виде спектров электромагнитных полей на поверхности грунта (непосредственно над залежью). Эти поля проявляются на аналоговых космических снимках в виде зон «повышенной яркости» с помощью высокочувствительной спектральной аппаратуры, в которой используются

измерительные модуляционные радиометры с автоматической глубиной модуляцией.

Для регистрации прямыми методами ореолов рассеяния УВ на поверхности грунта и характерных спектральных амплитудно-частотных характеристик электромагнитных полей над залежью применяются запатентованные способы «визуализации» электромагнитных полей на аналоговых космоснимках после их специальной обработки химическими реагентами (для усиления «зон повышенной яркости»).

Для надежного выделения зон «повышенной яркости» на аналоговых космических снимках на фотобумагу наносят химические реактивы, люминофоры, сенсibilизаторы и мелкодисперсные порошки металлов и ниобата лития. Это позволяет добиться увеличения свечения (зон повышенной яркости) на аналоговом спутниковом снимке (непосредственно над УВ аномалией).

Космические снимки расшифровываются после их выдержки в радиационных полях гамма-излучения. Под каждый тип идентифицируемых УВ и пород УВ-коллекторов, а также солёных глубокозалегающих вод подбираются различные типы сенсibilизаторов и порошков необходимых редких металлов (установленных экспериментально). Высокочастотные нано-порошки получают с помощью микробных технологий или покупают.

Комплект стационарной аппаратуры позволяет изучить химический состав проб нефти, определить концентрации металлов никеля и вольфрама, а также других металлов и примесей в нефти, произвести запись информационно-энергетических (электромагнитных) спектров образцов проб нефти (с конкретным составом металлов), углеводородных газов (метана, этана, пропана), пород нефтегазовых коллекторов и пластов солёной воды и перенести записанные ЯМР-спектры на металлоорганические носители (матрицы).

Стационарная аппаратура также используется для оконтуривания УВ-аномалий при расшифровке аналоговых космических снимков высокого разрешения и для обеспечения их предварительной радиационно-химической обработки.

Авторское программное обеспечение позволяет рассчитать глубину залежей УВ по результатам космической разведки. Для расчёта глубин залегания УВ-коллекторов в выявленных аномалиях (в 2 -3 точках) с применением только космической разведки необходимо определить значения «смещений» границ аномалий, определяемых по двум аналоговым космическим снимкам, произведенным с 2-х спутников, имеющих разные углы наклона орбит.

В точках замера глубин строятся разрезы со средними эффективными мощностями УВ-горизонтов и проводится предварительная оценка ресурсов.

Работы по данной технологии выполняются следующим образом:

- Прогнозно-оценочная космическая разведка по выявлению и оконтуриванию УВ-аномалий, а также расчёт глубин залегания УВ-коллекторов в 2-3 точках измерения. Выбор перспективных аномалий.
- Выявление и оконтуривание каждого типа УВ-аномалий (нефть, газ, газовый конденсат) и определение глубин их залегания проводится путём расшифровки серии цифровых и аналоговых космических снимков высокого разрешения, выполненных в различных спектрах электромагнитного излучения (видимых, ИК, УФ и в невидимых спектрах). По видимым спектрам отраженного излучения определяются первичные участки с признаками УВ-залежей (ореолов рассеяния УВ), а невидимые спектры характерных электромагнитных полей «визуализируются» в виде зон «повышенной яркости» на аналоговых космических снимках высокого разрешения непосредственно над залежами УВ.
- Обработка спутниковых снимков для визуализации границ месторождений УВ в виде зон «повышенной яркости».
- Построение схематичного геологического разреза УВ аномалии по точкам измерения с указанием количества залежей УВ и их мощности.
- Оценка предварительных ресурсов УВ в каждой выявленной аномалии вероятностным методом на основе расчётных параметров залежи.
- Выбор точек для бурения продуктивных скважин.
- Подготовка итогового отчета. Выявление наиболее перспективных аномалий, подготовка картографических материалов.

При этом осуществляются следующие мероприятия:

1. Закупка необходимых химических реагентов, расходных материалов, вспомогательных технических средств, настройка и поверка используемой стационарной аппаратуры, входящей в состав геофизического комплекса. Получение карт района поиска и заказ первичной серии цифровых космических снимков в разных частотных диапазонах, охватывающих район поисковых работ.

2. Получение от Заказчика проб нефти (при наличии), характерных для исследуемого участка и координаты эталонной скважины с ближайшего месторождения.
3. Изучение состава нефти, запись с проб нефти информационно-энергетических спектров и ЯМР-спектров атомов металлов, содержащихся в пробах нефти.
4. Изготовление «тестовых» и «рабочих» металлоорганических матриц для записи на них распознавательных информационно-энергетических спектров образцов нефти, и ЯМР-спектров атомов реперных металлов.
5. Активация «рабочих» и «тестовых» матриц с помощью радиационно-химических технологий и запись на них распознавательных электромагнитных спектров (информационно-энергетических спектров и ЯМР-спектров атомов реперных металлов) с применением блоков записи стационарного комплексного оборудования.
6. Проверка работоспособности и калибровка стационарной аппаратуры для избирательной регистрации различных типов представленных образцов нефти с применением «рабочих» и «тестовых» матриц, а также предполагаемых типов пород-коллекторов (из картотеки Исполнителя).
7. Получение цифровых спутниковых изображений и их расшифровка по традиционной технологии для определения границ перспективных участков с первичными признаками УВ.
8. Получение аналоговых спутниковых изображений, охватывающих перспективные площади с первичными признаками УВ.
9. Получение аналоговых космических снимков, охватывающих местоположение тестовой скважины с близлежащего месторождения. Координаты скважины предоставляются Заказчиком.
10. Обработка полученных аналоговых спутниковых изображений гамма-излучением и их расшифровка с использованием запатентованной технологии визуализации зон «высокой яркости» над конкретным типом УВ аномалии, расположенной вокруг тестовой скважины.
11. Калибровка стационарного комплексного оборудования для чёткого выявления известной залежи нефти или газа вокруг тестовой скважины и определения глубины залегания скопления УВ.
12. Радиационная обработка аналоговых космических снимков и их расшифровка по авторской технологии для определения типа УВ-аномалии на обследуемом участке, оконтуривание и перенос их границ на космические снимки с

координатной сеткой. Определение размеров аномалии. Химические реагенты, люминофоры и сенсibilизаторы подбираются индивидуально для каждого типа УВ аномалии.

13. Радиационная обработка дополнительной серии аналоговых космических снимков для определения по ним глубин залегания УВ-коллекторов в аномалии по величине «сдвига» границ контуров аномалий, определённой по двум космоснимкам, выполненным с двух спутников, имеющих различные наклоны орбит. Обычно для каждой аномалии используют шесть аналоговых космических снимков высокого разрешения, поскольку глубины определяются в 2-3 точках на каждой аномалии.
14. Радиационная обработка аналоговых космических снимков и расшифровка цифровых снимков в ИК-диапазоне для определения и картирования сети тектонических разломов с миграцией по ним высокотемпературных флюидных потоков.

Достоверность (статистическая точность) информации (выявление перспективных аномалий, количество залежей УВ и воды, их глубин и мощностей) составляет 60-70%.

Преимущества и отличительные особенности технологии

1. Универсальность, возможность дистанционного поиска любых видов полезных ископаемых (нефти, газа, металлических рудных тел, алмазов, угля, редких металлов и т.д.), а также подземных солёных, термальных маломинерализованных и пресных вод;
2. Высокая успешность (статистическая точность) выявления УВ (>90%), возможность определения глубин залегания УВ и предварительной оценки ресурсов перед разведочным бурением;
3. Возможность дистанционного выявления и первичного оконтуривания залежей УВ на цифровых космических снимках (первичная визуализация) в виде ореолов рассеяния УВ, что обеспечивает масштабность поисков (за счёт охвата больших площадей 60×60 км) и сокращает время геологоразведочных работ;
4. Высокая экономическая эффективность;
5. Возможность принять решение о необходимости проведения полного объёма геологоразведочных работ без использования нескольких традиционных

методов (магнитной, сейсмической, радиационной и геохимической разведки, электроразведки и т.д.), поскольку данная технология позволяет непосредственно выявлять и определять тип, «конфигурацию» залежи, ловушку, заполненную УВ, а не геофизические признаки и особенности, которые традиционно учитываются при принятии решений о выборе мест бурения разведочных скважин с целью подтверждения наличия выявленных «геологических структур»;

6. Возможность обследования труднодоступных (болотистых, лесистых, горных) территорий; как на суше, так и на море;
7. Обеспечение обнаружения и выявления типов УВ аномалий (нефти, газа, газового конденсата) и оконтуривания их границ без сейсморазведки и бурения;
8. Способность выявлять тектонические разломы, заполненные грунтовыми водами, и определять миграцию грунтовых вод по ним;
9. Высокая эффективность на этапе первичного выявления скоплений УВ и подземных вод на больших территориях (2-4 месяца).
10. Возможность выбирать наиболее перспективные площади с залежами УВ (наиболее перспективные УВ аномалии) до разведочного бурения и места бурения продуктивных скважин, что превышает возможности традиционных геофизических методов разведки.

Литература

1. Белявский Г.А., Ковалев Н.И., Лавренев О.Н. и др. Технология применения аппаратуры ЯМР для дистанционного обнаружения объектов под землей и под водой, определение мест протечек подземных и подводных нефтепроводов. Доклад на IV Международной конференции спасателей. НТСБ МЧС Украины, г. Киев, 2003 г., 5 с.
2. Белявский Г.А., Ковалёв Н.И., Гох В.А. Новое в дистанционной технологии экологического мониторинга подземных и подводных объектов, а также полезных ископаемых. // Экология и ресурсы, г. Киев, вып.№ 9,с.108-114, 2004 г.
3. Ковалев Н.И., Филимонова Т.А. и др. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах, ж-л Института оптики атмосферы СО РАН. Материалы III Всероссийской конференции «Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа», 20 - 24 сентября 2004 г., г.Томск, стр. 67-70.
4. Белявский Г.А., Исаенко В.М., Ковалёв Н.И., Николаев К.Д. Экологическая безопасность Азово-Черного шельфа. Экология и ресурсы. Совет национальной безопасности и обороны Украины., вып.1, г.Киев, 2007, стр. 20-28.
5. Ковалёв Н.И., Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Дистанционное обнаружение, регистрация и идентификация радиоактивных и стабильных изотопов на основе применения лазеров. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.2(23), 2007, с.184 - 195.
6. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Ковалёв Н.И.Монография. Лазеры. Теория и приложения. Севастополь, изд.Черкасский ЦНТЭИ. 2008.532с.
7. Ковалёв Н.И., Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Применение резонансных методов лазерного разделения изотопов в процессах обогащения урана. Сборник научных трудов СНУЯЭиП г.Севастополь, вып.3(27), 2008, 6 с.
8. Ковалёв Н.И., Солдатова С.В., Белявский Г.А., Гох В.А., Черкашин И.А. Методика дистанционного поиска различных объектов под грунтом. Сб. докладов VI международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7-10 октября 2008г. СПбГУ НИИФизики им. В.А.Фока, СПб. 2009, с.123 - 127.

9. Ковалев Н.И., Черкашин И.А., Солдатова С.В., Гох В.А., Рубцов Г.А. Применение способа и технологии дистанционного поиска и идентификации затопленных объектов, представляющих экологическую опасность. В сб. трудов VI международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7-10 октября 2008г. СПб. 2009, с.123 - 127.
10. Н.И. Ковалев, В.А. Гох, А.М. Акимов и др. Использование геологографического комплекса «Поиск» для обнаружения различных полезных ископаемых и определение путей миграции радионуклидов и токсичных веществ из хвостохранилищ предприятий ЯТЦ - Экология и атомная энергетика, вып.1, 2009, с.64-67.
11. Ковалёв Н.И. Опыт применения дистанционных технологий поиска месторождений меди и золота в Монголии. // Scientific Transactions (Научные исследования), г.Улан-Батор, Монгольский университет науки и техники. №4/106, 2009г.
12. Ковалёв Н.И., Гох В.А., Солдатова С.В. и др. Использование дистанционного геологографического комплекса «Поиск» для обнаружения и оконтуривания углеводородных месторождений // Геоинформатика №3, 2009, с.83 - 87.
13. Пухлий В.А., Ковалёв Н.И. Вопросы сходимости и оценки погрешности аналитического решения в задачах теории ядерного магнитного резонанса. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.3(31), 2009, с.252 - 261.
14. Пухлий В.А., Ковалёв Н.И. Метод аналитического решения нелинейных задач теории ядерного магнитного резонанса. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.2(30), 2009, с.219-228.
15. Ковалёв Н.И., Гох В.А., Иващенко П.Н., Солдатова С. В. Опыт практического использования аппаратуры комплекса «Поиск» по определению границ нефтегазоносных участков и выбора точек под бурение скважин. Геоинформатика, 2010, №4, с.5.
16. Ковалев Н.И., Акимов А.М., Лямцева И.В. Дистанционное определение фронта подземного загрязнения грунта радионуклидами и токсичными веществами при миграции их из хвостохранилищ. Вопросы химии и химической технологии, №1, 2010 г., с 135÷138.
17. Н.И. Ковалев, С.В. Солдатова, Г.А. Белявский. Возможности использования комплекса «Поиск» для обнаружения экологически

опасных объектов в водной среде и районирования подводных загрязненных грунтов. Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», серия; Машиностроение, 2010 г., №58, с. 53÷58.

18. Ковалёв Н.И., Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Точное решение начальной задачи Коши для автодина. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.3(36), 2010 г.
19. Ковалев Н.И., Лямцева И.В., Белявский Г.А. Опыт дистанционного определения аппаратурой комплекса «Поиск» объемов подземного радиоактивного грунта и путей подземной миграции радионуклидов из хвостохранилищ урановых предприятий, Сборник докладов НТК «Проблемы обнаружения с радиоактивными отходами в Украине», г. Киев, 2010 г., с.65÷70.
20. Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н., Пищаный Ю.М., Божежа Д.Н., Ковалев Н.И., Гох В.А., Котелянец И.И. Опыт применения геоэлектрических методов для оперативного подтверждения перспектив нефтеносности разведочных участков / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г.Успенского, Москва, 25 - 29 января 2010 г. М.: ИФЗ РАН, 2010. - С. 221-226.
21. Акимов А.М., Ковалев Н.И., Григорьева В.Н. Аналитические решения задач спинового эха Хана в теории ядерно-магнитного резонанса. Сборник научных трудов СНУЯЭиП, г. Севастополь, вып.2(34) 2010, с. 242-253.
22. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Ковалёв Н.И. Об одном подходе к решению задач с сильной и слабой нелинейностью в квантовой радиофизике. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.3(35), 2010, с.267 - 276.
23. Акимов А.М., Ковалев Н.И., Григорьева В.Н., Суховаров-Жерновой Б.В. Технология добычи и переработки урановых руд, учебник (МОН Украины), СНУЯЭиП, г. Севастополь, 2010, с. 327.
- 24.24. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Ковалёв Н.И. Ядерный магнитный резонанс, Т.2., Теория и приложения. Монография. Севастополь, изд. Черкасский ЦНТЭИ. 2010. 670с.

25. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Ковалёв Н.И. Аналитическое решение задачи о реакции контура в магнитном поле Земли. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.3(35), 2010, с.145 - 154.
26. Ковалёв Н.И., Черкашин И.А., Солдатова С.В. Исследование особенностей залегания газовых аномалий в сланцевых породах и породах под угольными пластами с применением аппаратуры дистанционного комплекса «Поиск». Сб. трудов Третья международная конференция «Экология и космос». 30мая -1июня 2011 г.СПб. 2011, с.241-248.
27. Пухлий В.А., Ковалёв Н.И. Солитоны и нелинейные уравнения Шредингера. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.1(37), 2011 г.
28. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А., Ковалёв Н.И. Резонансы в физике. Т.1 Квантовая механика и магнетизм. (Монография). Севастополь, изд.Черкасский ЦНТЭИ. 2011.586с.
29. Ковалёв Н.И. Применение дистанционного геоолографического комплекса зондирования Земли «Поиск» для прямого определения углеводородных и полиметаллических месторождений. В трудах 8 Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 30сентября - 5 октября 2012 г. СПб. СПбГУ, с.65.
30. Ковалев Н.И., Гриднев К.А., Пухлий В.А.Об аналитическом подходе к решению задачи реакции приемного контура в слабом магнитном поле. В сб. трудов VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», 1÷5 сентября 2012 г., С Пб.2012, стр. 214÷221.
31. Ковалев Н.И., Григорьева В.Н., Пухлий В.А. О сходимости аналитического решения в задачи теорий ядерно-магнитного резонанса. Сборник трудов VIII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли», 1-5 сентября 2012, Спб 2012, стр. 229-233.
32. Ковалев Н.И., Гриднев К.А., Пухлий В.А. К задаче о реакции приемного контура в магнитном поле Земли. В сб. трудов VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», 1÷5 сентября 2012, г. С Пб.2012, стр. 222÷228.

33. Ковалев Н.И. Физические основы геогеографического дистанционного зондирования. В сб. трудов VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», 1÷5 сентября 2012 г., С Пб.2012, стр. 141÷142.
34. Ковалев Н.И. Дистанционное зондирование геоэкологических объектов. В сб. трудов VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», 1÷5 сентября 2012 г., С Пб.2012, стр. 211÷213.
35. Кудрик И.Д., Ковалев Н.И., Бежавский С.Г., Хребтова Т.В., Ошкадер А.В., Монография. «Экологический мониторинг курортно-туристических ресурсов Крыма», гл. 6÷8, стр. 152÷186 (Мин. Экол. Украины), изд. Черкасский ЦНТЭИ, 2013 г., 257 с.
36. Ковалев Н.И., Гох В.А., Солдатова С.В., Бежавский Г.А., Иващенко П.Н. Исследование механизма образования подземных пресных вод вблизи магматических очагов затухших вулканов с применением аппаратуры дистанционного резонансно-тестового комплекса «Поиск». Труды международного семинара от 08.02.2013 г. «Экология и космос», г. С-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014 г., стр. 173÷185.
37. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. О механизме образования объемных взрывов и детонации углеводородных газов в угольных шахтах. В сб. статей международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки», 31 января 2014 г., г. Уфа, ч. III, Баш ГУ, 2014 г., С. 153÷162.
38. Ковалев Н.И. Опыт прогнозно-геологических исследований углеводородных аномалий с помощью резонансно-тестовой аппаратуры «Поиск», Вторая международная конференция, «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов», 22÷24 апреля 2014 г., ФГУП «ВСЕГЕИ», г. С-Петербург, (сайт «ВСЕГЕИ»).
39. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. К вопросу о механизме образования объемных взрывов и детонации углеводородных газов в угольных шахтах. Сборник научных трудов Севастопольский Национальный университет Ядерной Энергии и Промышленности, 2014 г., С.190-200.

40. Ковалев Н.И., Белявский Г.А., Пухлий В.А. Опыт прогнозно-геологических исследований углеводородных аномалий с помощью дистанционной резонансно-тестовой аппаратуры геофизического комплекса «Поиск». XV международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований», г. Москва №6, 2015 г., С. 106-117.
41. Пухлий В.А., Ковалев Н.И. К решению начальной задачи Коши для автодина. Международный научный журнал «Инновационная наука», г.Уфа, №9/2015 г., 18 с.
42. Пухлий В.А., Ковалев Н.И. К задаче о реакции приемного контура в магнитном поле земли. XVII международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований», г. Москва №8, 2015 г., С. 111-115.
43. Ковалев Н.И., Акимов А.М., Солдатова С.В. О причинах возникновения объемных взрывов углеводородных газов в угольных шахтах. «Экология и развитие общества», №2(13) 2015 г., с.52-57.
44. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В., Померанская А.К. Резонансные проблемы обеспечения сохранности водных ресурсов Чернореченского водохранилища, г.Севастополь, Евразийский союз ученых (ЕСУ) №2(11), /Наука о земле/, г. Москва. 2015 г., 12 с.
45. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. Применение дистанционного геофизического комплекса «Поиск». (Решение инженерных и геолого-поисковых задач), Монография, Palmarium academic publishing, Германия, г.Дюссельдорф, 2016, 170 с.
46. Ковалев Н.И., Фролова Л.А., Солдатова С.В. Апробация дистанционного геофизического комплекса «Поиск» при обнаружении и анализе запасов подземных пресных и геотермальных вод. «Синергия наук», №14, С.-Петербург, 2017, С.502-507.
47. Ковалев Н.И., Лукина Л.И., Белявский Г.А., Солдатова С.В. Влияние вторичных магматических очагов потухших вулканов на образование подземных пресных вод. Сборник статей научно-технической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2017», 15-16 мая 2017, г. Севастополь, С.633-639.

48. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. Результаты исследований механизма образования подземных пресных вод вблизи вторичных магматических очагов потухших вулканов. Сборник Академическая наука - проблемы и достижения. Материалы XII международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 15-16 мая, 2017 г., С.48-60.
49. Ковалев Н.И., Пухлий В.А., Солдатова С.В. Исследования механизма образования подземных пресных вод вблизи магматических очагов потухших вулканов с применением аппаратуры дистанционного резонансно-тестового комплекса «Поиск», Инновационная наука, том 1, №3, г. Уфа, 2017 г., С.277-287.
50. Ковалев Н.И., Лукина Л.И., Солдатова С.В., Фролова Л.А. Исследование нового источника угрозы объёмных взрывов метана на угольных шахтах. Сборник статей международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2018», 24-27 сентября, 2018 г., С.561-566.
51. Коротаев С.М. Гелиогеофизические эффекты нелокальности - тени будущего в настоящем // Квантовая Магия, том 1, вып. 2
52. Шноль С.Э., Панчелюга В.А. Космофизические эффекты в временных рядах
53. Уруцкоев Л.И., Ликсонов В.И., Циноев В.Г. Экспериментальное обнаружение странного излучения и трансмутация химических элементов // Прикладная физика. № 4. 2000. С.
54. Балакирев В.Ф., Крымский В.В. Низкотемпературная трансмутация химических элементов с выделением энергии при электромагнитных воздействиях // Изв. Челяб. НЦ., Вып. 4 (21), 2003
55. Benford M. S. Probable Axion Detection via Consistent Radiographic Findings after Exposure to a Shpilman Axion Generator // Journal of Theoretics Vol.4.
56. Майборода В.П., Акимов А.Е., Тарасенко В.Я. и др. Структура и свойства меди, унаследованные из расплава после воздействия на него торсионным излучением. // Прикладная физика. - 1995. - N 2. - С.73-76.
57. Панов В.Ф., Курапов С.А. Полевое глубинное воздействие на расплавы металла. // Сборник трудов МИС-РТ., 2005 г. N 35.- С.3

58. Мельник И.А. Дистанционное воздействие вращающихся объектов на полупроводниковый детектор гамма излучения. // Новая энергетика, 1(20), 2005.
59. Гринштейн М., Эткин В.А. О переносе спектральных копий по линиям связи (http://samlib.ru/e/etkin_w). 09/01/2015).
60. Акимов А. Е. Эвристическое обсуждение проблемы поиска новых дальнодействий. EGS-концепции // Сознание и физический мир: Сб. стат. - М.: Яхтсмен, 1995. - Вып.1. - С.36-84.
61. Эткин В.А. О единой природе всех взаимодействий.
62. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии) СПб.; "Наука", 2008.- 409 с.
63. Эткин В.А. О потенциале и движущей силе лучистого энергообмена. // Вестник Дома ученых Хайфы, 2010.-Т.ХХ. - С.2-6.
64. Tamburini F., Mari E., Thidé Bo at al Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. //New Journal of Physics. - 14. - 033001.
65. Лаврентьев М.М., Еганова И.А. и др. О дистанционном воздействии звезд на резистор. // ДАН СССР, 1990, Т.314, Вып.2, С.352.
66. Эткин В.А. Энергодинамический вывод уравнений Максвелла. // Доклады независимых авторов, 2013. - Вып. 23.- С. 165-168.
67. Эткин В.А. Об избирательном взаимодействии / Вестник Дома Ученых Хайфы, 2012.- Т.29. С. 2-8.
68. Эткин В.А. О носителе энергоинформационных излучений.
69. Эткин В.А. К волновой теории взаимодействия.
70. Эткин В.А. Об энергоинформационном обмене
71. Белявский Г.А., Ковалев Н.И., Лавренев О.Н. и др. Технология применения аппаратуры ЯМР для дистанционного обнаружения объектов под землей и под водой, определение мест протечек подземных и подводных нефтепроводов. Доклад на IV Международной конференции спасателей. НТСБ МЧС Украины, г. Киев, 2003 г., 5 с.
72. Ковалев Н.И., Филимонова Т.А. и др. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах, ж-л Института оптики атмосферы СО РАН. Материалы III Всероссийской конференции

«Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа», 20 - 24 сентября 2004 г., г.Томск, стр. 67-70.

73. Ковалёв Н.И., Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Дистанционное обнаружение, регистрация и идентификация радиоактивных и стабильных изотопов на основе применения лазеров. В сб. Научные труды СНУЯЭиП, Севастополь, вып.2(23), 2007, с.184 - 195.
74. Ковалёв Н.И., Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Применение резонансных методов лазерного разделения изотопов в процессах обогащения урана. Сборник научных трудов СНУЯЭиП г.Севастополь, вып.3(27), 2008, 6 с.
75. Ковалёв Н.И., Солдатова С.В., Белявский Г.А., Гох В.А., Черкашин И.А. Методика дистанционного поиска различных объектов под грунтом. Сб. докладов VI международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7-10 октября 2008г. СПбГУ НИИФизики им. В.А.Фока, СПб. 2009, с.123 - 127.
76. Ковалев Н.И., Черкашин И.А., Солдатова С.В., Гох В.А., Рубцов Г.А. Применение способа и технологии дистанционного поиска и идентификации затопленных объектов, представляющих экологическую опасность. В сб. трудов VI международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7-10 октября 2008г. СПб. 2009, с.123 - 127.
77. Н.И. Ковалев, В.А. Гох, А.М. Акимов и др. Использование геологического комплекса «Поиск» для обнаружения различных полезных ископаемых и определение путей миграции радионуклидов и токсичных веществ из хвостохранилищ предприятий ЯТЦ - Экология и атомная энергетика, вып.1, 2009, с.64-67.
78. Ковалёв Н.И. Опыт применения дистанционных технологий поиска месторождений меди и золота в Монголии. // Scientific Transactions (Научные исследования), г.Улан-Батор, Монгольский университет науки и техники. №4/106, 2009г.
79. Ковалёв Н.И., Гох В.А., Солдатова С.В. и др. Использование дистанционного геологического комплекса «Поиск» для обнаружения и оконтуривания углеводородных месторождений // Геоинформатика №3, 2009, с.83 - 87.
80. Акимов А.М., Ковалев Н.И., Григорьева В.Н. Аналитические решения задач спинового эха Хана в теории ядерно-магнитного резонанса.

Сборник научных трудов СНУЯЭиП, г. Севастополь, вып.2(34) 2010, с. 242-253.

81. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А. Ковалёв Н.И. Ядерный магнитный резонанс, Т.2., Теория и приложения. Монография. Севастополь, изд. Черкасский ЦНТЭИ. 2010. 670с.
82. Ковалев Н.И. Опыт прогнозно-геологических исследований углеводородных аномалий с помощью резонансно-тестовой аппаратуры «Поиск», Вторая международная конференция, «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов», 22÷24 апреля 2014 г., ФГУП «ВСЕГЕИ» СПб

К ЗАДАЧЕ СПИНОВОГО ЭХА В ТЕОРИИ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Пухлий Владимир Александрович
Д.т.н., профессор СевГУ, г.Севастополь
Ковалев Николай Ильич
К.т.н., доцент СевГУ, г.Севастополь

TO A PROBLEM OF THE SPIN ECHO IN THE THEORY OF THE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

V.A.Pukhly, N.I. Kovalev, SebSU, Sebastopol

АННОТАЦИЯ

Рассматривается метод спинового эха Хана. Для решения начальной задачи Коши, состоящей из уравнений Блоха, предлагается аналитический подход, основанный на модифицированном методе последовательных приближений. Полученные результаты сравниваются с известными теоретическими и экспериментальными значениями. Отмечается хорошее совпадение.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, спиновое эхо, начальная задача Коши, аналитический подход, модифицированный метод последовательных приближений.

ABSTRACT

The spin-echo technique of the Khan is considered. For the decision of an initial problem of Koshi consisting of the equations the Flea, the analytical approach based on the modified approximation method is offered. The received results are compared to known theoretical and experimental values. Good coincidence is marked.

Keywords: nuclear magnetic resonance, a spin echo, an initial problem of Koshi, the analytical approach, the modified approximation method

Введение. Затухание сигнала свободной прецессии, обусловленное неоднородностью постоянного магнитного поля, является обратимым процессом. На этом свойстве обратимости основан один из нестационарных методов ЯМР – метод спинового эха. Сущность метода заключается в наблюдении сигналов ядерной индукции при воздействии на систему спинов несколькими радиочастотными импульсами.

Если поле H_1 включается лишь на короткое время t_w , малое по сравнению с T_1 или T_2 , тогда m^* в момент выключения еще сохраняет конечную величину. При этом возникает экспоненциально затухающая свободная прецессия вектора m , которая позволяет наблюдать сигнал в течение некоторого времени после выключения поля H_1 . Впервые данное явление обнаружил Ф.Блох [1]. Такие ме-

тоды обладают большими достоинствами, поскольку сигнал наблюдается без воздействия радиочастотного поля, при этом исключаются явление насыщения, а также другие эффекты, обусловленные полем Н1. Наблюдение сигнала упрощается, поскольку нет необходимости измерять малое напряжение сигнала в присутствии относительно большого переменного напряжения.

При экспериментальных исследованиях необходимо, чтобы времена релаксации превышали постоянную затухания радиочастотной системы T_c (время установления колебаний):

$$T_1, T_2^*, T_2 > T_c. \quad (1)$$

Следует заметить, что соотношения (1) обозначают отсутствие влияния аппаратуры (контура) на форму наблюдаемого сигнала, хотя в общем случае это не так и в действительности имеется обратное воздействие радиочастотного контура на спиновую систему.

Отметим, что принципиально новые возможности наблюдения ЯМР появляются в случаях воздействия на систему спинов нескольких радиочастотных импульсов, следующих друг за другом. Поведение ядерной намагниченности при двух импульсах, разделенных временем τ , впервые рассчитал Е. Хан [2], который также экспериментально открыл ряд эффектов. В частности, спустя время τ сек после второго радиочастотного импульса появляется сигнал, амплитуда которого зависит от τ . Данная зависимость определяется временем T_2 и трансляционной подвижностью отдельных ядер в образце. В результате становится возможным измерять время поперечной релаксации T_2 , не искаженное влиянием неоднородности магнитного поля.

Таким образом, метод спинового эхо применим в случае, когда:

$$\tau < T_1, T_2. \quad (2)$$

Метод спинового эхо является важным при исследовании процессов в жидкостях, поскольку именно жидкости характеризуются большими временами релаксации.

Следует отметить, что при добавлении третьего радиочастотного импульса, можно измерить также T_1 . Среди множества вариантов с различными комбинациями импульсов наибольшее значение имеют два: а) метод Хана с двумя-тремя импульсами [2]; б) метод Карра и Парселла [3].

Явление спинового эхо можно использовать для задержки и оперативного запоминания радиочастотных сигналов. Если в двухимпульсной методике рассматривать первый импульс как информационный, а второй импульс рассматривать как управляющий (или считывающий), тогда при регулировании интервала между импульсами возможно вызвать сигнал эхо в определенный момент времени. Следовательно, спиновая система будет выполнять функцию запоминающего устройства.

Устройства для обработки информации, основанные на методе спинового эхо, носят название спиновых процессоров.

Весьма важными являются случаи, когда информационный импульс является слабым (малосигнальное приближение). В этих случаях спиновая система функционирует в линейном режиме относительно информационного сигнала, в результате спиновое эхо воспроизводит сигнал по форме, но в зеркальном, т.е. обращенном во времени изображении.

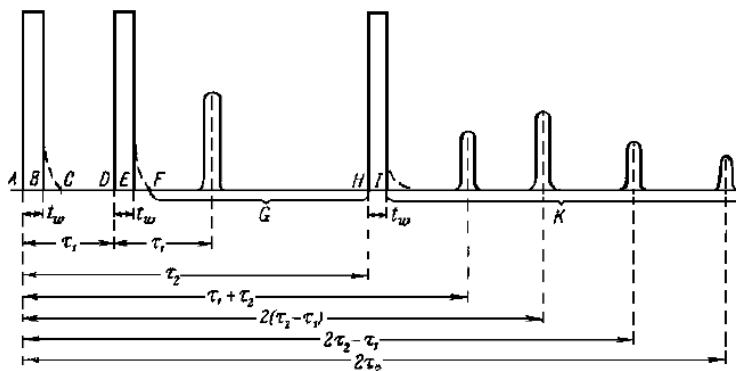


Рисунок 1. Распределение во времени радиочастотных импульсов и сигналов эхо в методе Хана

Математическая теория спинового эхо. Физические основы появления сигнала спинового эхо достаточно хорошо демонстрируются при помощи векторной модели [4]. На рис. 1 показано распределение во времени радиочастотных импульсов и сигналов эхо в методе Хана.

В качестве математической теории используются известные уравнения Блоха [5], которые представляют собой уравнения движения магнитных моментов μ . В результате для трех компонент ядерной намагниченности можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} - \gamma(M_y H_z - M_z H_y) + \frac{1}{T_2} M_x &= 0; \\ \frac{dM_y}{dt} - \gamma(M_z H_x - M_x H_z) + \frac{1}{T_2} M_y &= 0; \\ \frac{dM_z}{dt} - \gamma(M_x H_y - M_y H_x) + \frac{1}{T_1} M_z &= \frac{1}{T_1} M. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В уравнениях (3) M – равновесная намагниченность ($M = \chi H$), а M_x, M_y, M_z – мгновенные значения, намагниченности, обусловленные внешними воздействиями; T_1 – время продольной релаксации; T_2 – время поперечной релаксации; γ – гиромагнитное отношение.

Действующее в плоскости xy переменное магнитное поле является линейно поляризованным (с амплитудой $2H_1$). Компоненты поля:

$$H_x = H_1 \cos \omega t; \quad H_y = \mp H_1 \sin \omega t; \quad H_z = H. \quad (4)$$

При этом знак компоненты H_y определяется знаком γ .

Кроме того, имеем:

$$M = \chi H. \quad (5)$$

Поскольку фазовый угол между $M_{\perp}$ и G_1 будет зависеть от $\omega - \omega_0$ и от других условий, введем вместо M_x и M_y две новые компоненты:

$$\begin{aligned} M_x &= u \cdot \cos \omega t - v \cdot \sin \omega t; \\ M_y &= \mp (u \cdot \sin \omega t + v \cdot \cos \omega t). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь u – намагниченность, вращающаяся синфазно с $G1$, а v – намагниченность, опережающая $G1$ на $\pi/2$.
Подставляя выражения (6) и (4) в уравнения (3), получим:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{du}{dt} - v\omega + |\gamma|vH + \frac{u}{T_2^*} \right) \cos \omega t - \left(\frac{dv}{dt} + u\omega - |\gamma|uH + |\gamma|H_1 M_z + \frac{v}{T_2^*} \right) \sin \omega t = 0; \\ &\mp \left\{ \left(\frac{dv}{dt} + u\omega - |\gamma|uH + |\gamma|H_1 M_z + \frac{v}{T_2^*} \right) \cos \omega t - \left(\frac{du}{dt} - v\omega + |\gamma|vH + \frac{u}{T_2^*} \right) \sin \omega t \right\} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dM_z}{dt} - |\gamma|vH_1 + \frac{1}{T_1}(M_z - M) = 0$$

Введем следующее обозначение:

$$\Delta\omega = \gamma H - \omega = \omega_0 - \omega. \quad (8)$$

Тогда уравнение (3) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} + \frac{u}{T_2^*} + \Delta\omega v &= 0; \\ \frac{dv}{dt} + \frac{v}{T_2^*} - \Delta\omega u &= -|\gamma|H_1 M_z; \\ \frac{dM_z}{dt} + \frac{M_z}{T_1} - |\gamma|vH_1 &= \frac{M}{T_1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \tau &= |\gamma|H_1 t; & \alpha &= \frac{1}{|\gamma|H_1} \frac{1}{T_1}; \\ \beta^* &= \frac{1}{|\gamma|H_1} \frac{1}{T_2^*}; & \delta &= \frac{\Delta\omega}{|\gamma|H_1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда из (3) получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du}{d\tau} + \beta^* u + \delta v &= 0; \\ \frac{dv}{d\tau} + \beta^* v - \delta u + M_z &= 0; \\ \frac{dM_z}{d\tau} + \alpha M_z - v &= \alpha M. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Следует отметить, что

$$\chi' = \frac{u}{2H_1}; \quad \chi'' = \frac{v}{2H_1}. \quad (12)$$

Таким образом, χ'' и v выражает поглощенную мощность, т.е. сигнал поглощения, а χ' или u выражает сигнал дисперсии. Таким образом, χ'' вызывает изменение добротности контура, χ' – его расстройку. Как известно, классические уравнения Блоха справедливы для одиночных узких линий, характерных для жидкостей. В этом случае они достаточно удовлетворительно описывают основные черты явления ЯМР. Анализ решения этих уравнений позволяет получить сведения об интенсивности, ширине и форме резонансной линии, явления насыщения, переходных процессах и т.д.

К уравнениям Блоха должны быть присоединены начальные условия, которые, как правило, определяются величинами M_x , M_y , M_z .

Следует отметить, что общее решение системы уравнений (3) представляет значительные трудности, поскольку величины H_z и ω зависят от времени, т.е. система (3) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами [6].

Известны различные подходы к решению системы уравнений Блоха. Одно из первых было решение С.Д.Гвоздова и А.А.Магазаника [7], при котором система уравнений ЯМР сводилась к интегральному уравнению Вольтерра второго рода, решаемое методом последовательных приближений. Однако, получающиеся при этом подходе ряды обладают медленной сходимостью, в результате чего указанный подход мало пригоден для практического применения.

Следует также отметить, что все полученные результаты, как правило, относятся либо к идеализированным моделям, либо к предельным случаям медленного или быстрого включения.

Аналитическое решение уравнений Блоха. Система уравнений Блоха с точки зрения математической физики представляет собой начальную задачу Коши для нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая представляется следующим образом [6]:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \frac{dy_2}{dx} = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dy_n}{dx} = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \end{cases}, \quad \begin{cases} y_1(x_0) = y_{01} \\ y_2(x_0) = y_{02} \\ \dots\dots\dots \\ y_n(x_0) = y_{0n} \end{cases}, \quad (13)$$

или в матричной форме:

$$\frac{d\mathbf{y}}{dx} = \mathbf{f}(x, \mathbf{y}), \quad \mathbf{y}(x_0) = \mathbf{y}_0, \quad (14)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y}_0 = \begin{pmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ \dots \\ y_{0n} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

где

Система дифференциальных уравнений связывает независимую переменную x , искомые функции $y_1, y_2, \dots, y_n$ и их первые производные. В данном случае решение задачи Коши заключается в отыскании функции $y_1 = y_1(x)$, $y_2 = y_2(x)$, ..., $y_n = y_n(x)$, обращающих каждое уравнение системы в тождество на конечном или бесконечном интервале (a, b) и удовлетворяющих начальным условиям.

Такая форма записи задачи Коши является канонической для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. К ней могут быть приведены как любые другие формы представления систем дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старших производных, так и дифференциальные уравнения высших порядков.

Приведение дифференциальных уравнений высших порядков к нормальной системе дифференциальных уравнений осуществляется по следующей схеме. Пусть имеется задача Коши следующего вида:

$$\frac{d^n y}{dx^n} = f\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2 y}{dx^2}, \dots, \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}}\right), \quad (16)$$

$$y(x_0) = y_{01}, \quad \frac{dy(x_0)}{dx} = y_{02}, \quad \frac{d^2 y(x_0)}{dx^2} = y_{03}, \dots, \quad \frac{d^{n-1} y(x_0)}{dx^{n-1}} = y_{0n}, \quad (17)$$

Замена переменных

$$y_1 = y, \quad y_2 = \frac{dy}{dx}, \quad y_n = \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}}, \quad (18)$$

сводит ее к нормальной системе дифференциальных уравнений с начальными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dx} &= y_2 \\ \frac{dy_2}{dx} &= y_3 \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dy_{n-1}}{dx} &= y_n \\ \frac{dy_n}{dx} &= f(x, y_1, \dots, y_n) \end{aligned} \quad \begin{cases} y_1(x_0) = y_{01} \\ y_2(x_0) = y_{02} \\ \dots\dots\dots \\ y_{n-1}(x_0) = y_{0n-1} \\ y_n(x_0) = y_{0n} \end{cases}, \quad (19)$$

образующих задачу Коши.

Для решения такой задачи Коши используются те же методы, что для обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Это обуславливается тем, что матричная форма записи задачи Коши для нормальной системы полностью совпадает с ее формулировкой для этих уравнений. Аналогична для нее и теорема о существовании единственного решения. Единственным отличием здесь является то, что вместо функций $y(x)$ и $f(x, y)$ используются вектор-функции y и f , состоящие из n функций $y_1(x)$, $y_2(x)$, ..., $y_n(x)$ и $f_1(x, y_1, \dots, y_n)$, $f_2(x, y_1, \dots, y_n)$, ..., $f_n(x, y_1, \dots, y_n)$, соответственно. При этом расчетные схемы методов и оценки их погрешностей сохраняются.

В дальнейшем к решению начальной задачи Коши применяется модифицированный метод последовательных приближений, разработанный профессором В.А.Пухлией и опубликованный им в изданиях Академии наук [8,9]. Рассмотренный в настоящем разделе модифицированный метод последовательных приближений [8,9] отличается от классического метода Пикара тем, что в процессе каждого последовательного приближения здесь не нужно удовлетворять граничным условиям задачи, которые выполняются только один раз для построенного по определенным правилам общего решения дифференциального уравнения, либо системы их. Впоследствии был также разработан вариант модифицированного метода последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева, который обладает существенной быстротой сходимости по сравнению с прежним вариантом.

Запишем систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^m A_{v,m} X_v + \lambda_m X_m, \quad (m = 1, 2, \dots, m^*) \quad (20)$$

Здесь X_m – неизвестные безразмерные функции; $A_{v,m}$ – переменные коэффициенты; λ_m – параметр частоты; $\xi = \frac{t}{t_0}$ – безразмерная временная координата; v – номер неизвестной функции, при которой стоит коэффициент $A_{v,m}$; m – номер уравнения.

Решение системы (20) будем строить модифицированным методом последовательных приближений [8,9]. В соответствии с методом переменные коэффициенты $A_{v,m}$ представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$A_{v,m} = \sum_{k=0}^q a_{v,m,k} \xi^k; \quad (21)$$

Общее решение системы дифференциальных уравнений (20) запишется следующим образом:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{m^*} C_{\mu} \left[\frac{\xi^{\mu-m}}{(\mu-m)!} \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right]; \quad (22)$$

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{\eta=0}^n \phi_{\eta} \cdot \lambda^{\eta}. \quad (23)$$

Здесь μ – номер фундаментальной функции; C_{μ} – постоянные интегрирования.

В выражении (23) функции ϕ_{η} определяются следующим образом:

– при $\eta = 0$

– при $\eta \neq 0$

$$\phi_{\eta=0} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,\mu,j,n} \frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!}; \quad (24)$$

$$\phi_{\eta \neq 0} = \sum_{j=1}^{\beta_1} b_{m,\mu,j,n}^* \frac{\xi^{n+j-2+\eta+\delta_1}}{(n+j-2-\eta+\delta_1)!}; \quad (25)$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Коэффициенты $b_{m,\mu,j,n}$ и $b_{m,\mu,j,n}^*$ в выражениях (24) и (25) определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$b_{m,\mu,j,n} = \sum_{v=1}^{m^*} \sum_{k=0}^q a_{v,m,k} b_{v,\mu,(n-1),\eta,(j-k)} \cdot \frac{1}{n+j-1} \prod_{\gamma=0}^k (n+j-1-\gamma) ; \quad (26)$$

$$b_{m,\mu,j,n}^* = \sum_{v=1}^{m^*} \sum_{k=0}^q a_{v,m,k} \cdot b_{v,\mu,(n-1),\eta,(j-k)} \cdot \frac{\prod_{\gamma=0}^k (n+j-2+\eta+\delta_1-\gamma)}{(n+j-2+\eta+\delta_1)} + \sum_{v=1}^{m^*} \sum_{k=0}^q \beta_{v,m,k} b_{v,\mu,(n-1),(\eta-1),(j-k+1)} \quad (27)$$

В дальнейшем удовлетворяя начальным условиям, получим систему однородных алгебраических уравнений относительно произвольных постоянных C_μ , решение которой и определяет спектр значений безразмерных частот λm .

Анализ полученных результатов. Предварительно следует отметить, что при численной реализации разработанного решения начальной задачи Коши, используемые

уравнения Блоха должны быть представлены в безразмерной форме.

При переходе в уравнениях Блоха к безразмерным величинам, необходимо выразить все магнитные моменты через равновесную намагниченность $M = \gamma H$, все времена через T_2 , а магнитные поля через ΔH_2 :

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{M_x}{M}; & X_2 &= \frac{M_y}{M}; & X_3 &= \frac{M_z}{M}; & h_1 &= H_1 \gamma T_2 = \frac{H}{\Delta H_2}; & h_m &= H_m \frac{\gamma T_2}{2} = \frac{H_m}{2 \Delta H_2}; \\ d_0 &= (\gamma H - \omega_0) T_2 = \frac{H - (\omega_0 / \gamma)}{\Delta H_2}; & S &= \frac{t}{T_2}; & b &= \frac{T_2}{T_1}; & \Omega &= \Omega_m T_2. \end{aligned}$$

Тогда вместо (3) получим новую систему уравнений в безразмерной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1}{ds} + X_1 + (d_0 + 2h_m \cos \Omega s) X_2 &= 0; \\ \frac{dX_2}{ds} + X_2 - (d_0 + 2h_m \cos \Omega s) X_1 + h_1 X_3 &= 0; \\ \frac{dX_3}{ds} + X_3 - h_1 X_2 &= b. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Здесь величина Ω характеризует периодическое изменение H , ее можно представить в виде:

$$\Omega = \frac{\Omega_m / \gamma}{\Delta H_2} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_2} \quad (29)$$

Таким образом, величина Ω равна отношению поля, соответствующего частоте модуляции Ωm к ширине линии, определяемой соотношением:

$$\Delta H_2 = \frac{1}{\gamma T_2} \quad (30)$$

В целом ряде работ Г.Пфайфера исследовались сигналы эхо методом Ха-

на в маловязких жидкостях (дистиллированная вода, раствор нитрата железа, 0,02 М-раствор CuSO_4). В частности, в [10], экспериментально было установлено, что наибольшая амплитуда сигнала наблюдается при:

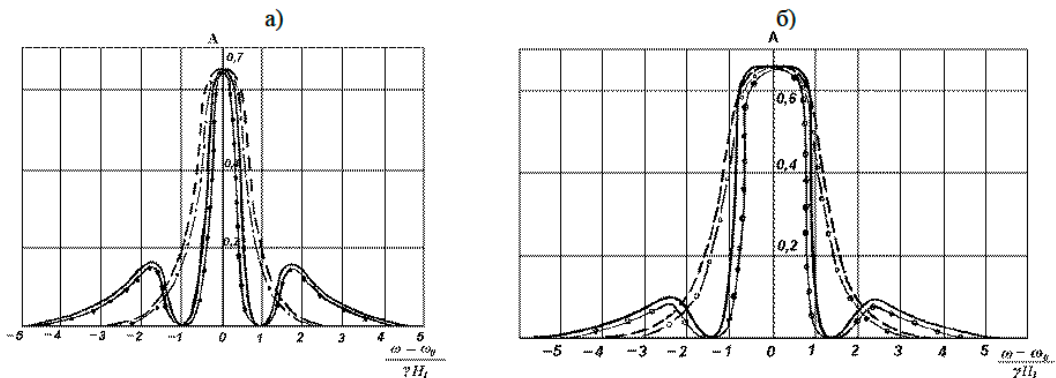


Рисунок 2. Влияние расстройки на амплитуду первичного эхо: а) — $\gamma H_1 t_w = 2\pi/3 + 2\pi$; — — $\gamma H_1 t_w = 2\pi/3$; б) — $\gamma H_1 t_w = 4\pi/3 + 2\pi$; — — $\gamma H_1 t_w = 4\pi/3$; —○— результаты авторов; — — результаты [10].

$$\xi_{\max} = \begin{cases} \frac{2\pi}{3} + 2n\pi, \\ \frac{4\pi}{3} + 2n\pi, \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (31)$$

Следует отметить, что условие (31) удовлетворяется подбором величины H_1 или t_w . Проведенные расчеты справедливы для случая, когда частота радиочастотного поля совпадает со средней резонансной частотой образца ω_0 . Г.Пфайфер вычислил зависимость амплитуды эхо от

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$ [10]. Если в выражении (31) $n = 0$ амплитуда эхо имеет единственный максимум при $\Delta\omega = 0$.

Ширина кривой $|v^*|_{\text{эхо}} = f(\Delta\omega)$ будет различной в зависимости от того, принято ли значение ξ равным $2\pi/3$ или $4\pi/3$. При $n = 1$ появляются кроме того, боковые максимумы, симметричные относительно $\Delta\omega = 0$. На рис.2

представлены расчетные кривые, которые были подтверждены и экспериментально. Результаты авторов представлены кривыми с кружочками. Как следует из рис.2 совпадение достаточно близкое.

На рис.3 представлены величины амплитуды спинового эхо в случае резонанса как функция от $t_w/\gamma H_1 T_2^{*2}$. Результаты авторов показаны на рис.3 кривыми с кружочками.

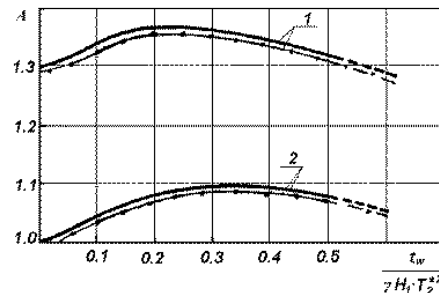


Рисунок 3. Величины амплитуды спинового эхо в случае резонанса, как функции от $t_w/\gamma H_1 T_2^{*2}$: кривая 1 –

$$\gamma H_1 t_w = \frac{2\pi}{3} + 2k\pi \quad ; \quad \frac{4\pi}{3} + 2k\pi \quad ; \quad \text{кривая 2 – } 2 - \gamma H_1 t_w = \frac{\pi}{2}.$$

Аналитическое рассмотрение осуществлялось на основе уравнений Блоха в форме (11):

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{d\tau} + \beta u + \delta v &= 0; \\ \frac{dv}{d\tau} + \beta v - \delta u + M_z &= 0; \\ \frac{dM_z}{d\tau} + \alpha M_z - v &= \alpha M. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Уравнения (32) получены из системы (11) при за-

мене β^* на величину β : $\beta = \frac{1}{|\gamma| H_1} \cdot \frac{1}{T_2}$.

Начальные условия принимались в виде:

$$u = u_0^* M, \quad v = v_0^* M, \quad M_z = m_0^* M.$$

Через $\delta\omega(t')$ обозначалось отклонение частоты прецессии одного спина к моменту t' от среднего значения ω_0 . Все ядра, находящиеся в одинаковом магнитном поле и следовательно имеющие одинаковые $\delta\omega(t')$, объединялись в одну изохроматическую группу [11].

В заключение следует особо подчеркнуть, что при измерении слабых магнитных полей, в частности, магнитного поля Земли, преимущество методов спинового эхо состоит в том, что при помощи вспомогательного поля искусственно увеличивается величина ядерной намагниченности, вследствие чего удается наблюдать ядерную индукцию в полях ниже 0,5 Гс. На этом принципе были разработаны магнитометры для измерения земного поля [12, 13], которые независимо от точной ориентации всегда дают абсолютное значение магнитного поля. Данные магнитометры возможно использовать на самолетах для быстрой оценки распределения магнитного поля Земли. Важным является также тот факт, что поскольку ошибка измерения частоты обратно пропорциональна времени, в течение которого осуществляется измерение, то при этом точность измерения ограничивается величиной T_2 , т.е. ошибка измерения определяется следующим соотноше-

$$\text{нием: } \delta H_k \approx \frac{1}{\gamma T_2}.$$

Экспериментальный прибор является очень простым, поскольку не требуется модуляции и, кроме того, точное значение и однородность поля H_0 не играют существенной роли.

Выводы

1. Предложен аналитический подход к решению задач спинового эхо Хана в теории ядерного магнитного резонанса.
2. Для решения начальных задач Коши, описываемых уравнениями Блоха, применяется модифицированный метод последовательных приближений [8,9].
3. Полученные результаты сравниваются с известными теоретическими и экспериментальными результатами других авторов. Отмечается хорошее совпадение.

Список литературы

1. Bloch F. Nuclear induction. – Phys. Rev., 1946, vol.70, p.460.
2. Hahn E.L. Spin-echos. – Phys. Rev., 1950, vol.80, №4, p.580-594.
3. Carr H.Y., Purcell E.M. Effects of Diffusion on free precession in nuclear resonance experiments. – Phys. Rev., 1954, vol.94, №3, p.630-638.
4. Лёве А. Ядерная индукция. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 681 с.
5. Bloch F., Wangsness R.K. Дифференциальные уравнения ядерной индукции. – Phys. Rev., vol.78, 1950, p.82.
6. Пухлий В.А. Численные методы. Теория и практика в среде MATLAB. В 2-х томах. Том I. – Севастополь, изд-во «Черкасский ЦНТЭИ», 2007. – 412 с. Том II. – Севастополь, Изд-во «Черкасский ЦНТЭИ», 2008. – 762 с.
7. Гвоздовер С.Д., Магазаник А.А. Изучение парамагнетизма атомных ядер методом магнито-спинового резонанса. – Журн. exper. и теорет. физики, том 20, вып.8, 1950, с.705-721.
8. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычисл. матем. и матем. физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.

9. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
10. Pfeifer H. Die amplitude des primären Echos bei der Hahnschen Spin-Echo-Methode. – Annalen der Physik, Band 17. Heft 1, 1955, s.23-27.
11. Das T.P., Saha A.K. Математический анализ экспериментов по спиновому эхо методом Хана. – Phys. Rev., vol.93, 1954, p.749.
12. Waters G.S., Philips G. Новый метод измерения магнитного поля Земли. – Geophys. prospecting., vol.4, 1956, p.1.
13. Zimmerman J.R., Williams D. Использование атома водорода в фотомагнитометрической съемке. – Oil and Gas, vol. 88, 1955.