

Модернизация наземных оверхаузеровских магнитометров POS для использования на беспилотных аэроносителях коптерного типа

В.А. Сапунов, А.Ю. Денисов, В.В. Савельев, С.Е. Киселёв (Уральский федеральный университет, НИЛ Квантовой магнитометрии), Нархов Е.Д., Сергеев А.В., Фёдоров А.Л., Широков А.А. (Уральский федеральный университет, МИП «КМПТ»), М.Ю. Попков (ООО «НПП «Структурная диагностика», Технопарк высоких технологий Свердловской области)

Введение

Новый вид магниторазведки, основанный на использовании беспилотных аэроносителей различных типов современных магнитометров, несмотря на отсутствие утверждённых методик и малый объём опытно-методических работ, становится всё более популярным как в России, так и за рубежом. В пилотируемой аэромагниторазведке, благодаря высокой скорости и чувствительности измерений порядка пико- и даже фемтотесл при быстродействии порядка 100 изм./сек., бесспорным лидером являются квантовые магнитометры на парах Цезия и Калия. В полевой наземной магниторазведке с оптическими квантовыми магнитометрами успешно конкурируют и даже занимают преобладающую долю рынка квантовые оверхаузеровские и протонные прецессионные магнитометры. Это обусловлено низким энергопотреблением и отсутствием необходимости непрерывного подогрева и стабилизации температуры датчиков, характерных для квантовых оптических магнитометров. Использование беспилотных аэроносителей, особенно коптерного типа, выдвигает противоречивые требования к современным магнитометрам для этого нового типа аэромагниторазведки. С одной стороны, требуются высокая чувствительность до сотых долей нТл и абсолютная точность и стабильность измерений лучше десятых долей нТл, характерные для требований аэромагниторазведки, а с другой стороны, необходимы параметры, превосходящие требования при наземных измерениях по массе и энергопотреблению датчиков, а именно: вес порядка 1-2 килограмм при непрерывном энергопотреблении не более 3-5 Вт. Ценовые характеристики как аппаратуры, так и стоимости БПЛА съёмки, также являются критическими для перспектив рынка беспилотной аэромагниторазведки, которая вне конкуренции для заболоченных и горных объектов. Данным критериям оптимально соответствует, по крайней мере, в нижнем ценовом сегменте рынка квантовых магнитометров, модернизированный наземный оверхаузеровский магнитометр POS-1, укомплектованный встроенной памятью регистрации непрерывных измерений, новым малогабаритным датчиком и прочным облегчённым корпусом блока электроники.

Обсуждение конкурирующих типов геологоразведочных БПЛА магнитометров выходит за рамки данной публикации, но хотим отметить, что феррозондовые магнитометры, не нашедшие широкого применения в стандартной наземной и аэро- магниторазведке, при успешном преодолении проблем точности скалярных измерений, то есть в случае реализации линейности компонентных измерений с вычислением модуля поля, при исключении дрейфа нуля и температурных эффектов, имеют высокие шансы внедрения, благодаря высокой чувствительности и быстродействию при низком энергопотреблении. Малоперспективным считаем использование феррозондовых короткобазных градиентометров, рекламируемым в последнее время, для целей разведочной геологии и особенно нефтегазовой геофизики, за исключением поисковых задач по сильномагнитным объектам.

Следует отметить серьёзные успехи в развитии цезиевых, калиевых и рубидиевых квантовых БПЛА магнитометров с обычной ламповой и/или лазерной накачкой, показывающие достаточно низкое энергопотребление при высокой чувствительности в единицы пикоТл/Гц^{1/2}, хотя абсолютная точность и ориентационные погрешности иногда достигают 5 нТл (Johnson, 2013; Veloski et al. 2018). Этот недостаток может учитываться соответствующими методическими приёмами при геологоразведочном магнитном картировании. К сожалению, неизвестен рабочий ресурс ячеек и/или лазеров оптической накачки, составляющих обычно несколько тысяч часов. Также недостатком является то, что оптические магнитометры являются достаточно дорогими,

превосходящими по цене собственно лёгкие многороторные коптерные БПЛА. В любом случае, применимость и конкурентоспособность новых магнитометров должна подтверждаться техническими параметрами, полученными на эталонах слабого магнитного поля и при сравнительных опытно-методических работах.

Конструкция, параметры и описание особенностей БПЛА магнитометра POS-1aero

При наземной (пешеходной) магниторазведке достаточную популярность в РФ приобрёл мобильный магнитометр MMPOS, основанный на процессорном оверхаузеровском сенсоре POS и специализированном регистраторе DLPOS (data logger). Непосредственно процессорный датчик POS является магнитометром управляемым только по последовательному порту RS232 с выдачей цифровых измерений, полученных в специализированном процессорном микроконтроллере обработки сигнала протонной прецессии усиленном с помощью квантового эффекта Оверхаузера (динамической поляризации ядер растворов парамагнитных радикалов).

Магнитометр POS, после инициализации командой непрерывных измерений, способен работать в автономном режиме, что навело на идею его адаптации для применения на автономных БПЛА. В первую очередь, была проведена разработка регистратора, который перехватывал результаты измерений с привязкой по времени и сохранял их в энергонезависимой флэш памяти (SD карта). Конструктив опционального регистратора был разработан так чтобы устанавливаться в стандартный блок электроники с минимальной переделкой одной из его крышек для вывода светодиодов индикации состояния и режима измерений (рис 1). При специализированном изготовлении используется облегчённый корпус, который допускает использование как на БПЛА, так и при обычной пешеходной магниторазведке. Также была проведена модернизация оверхаузеровского датчика с уменьшением размеров до $\varnothing 50 \times 105$ мм и веса до 400 грамм. Имеется модификация датчика с весом 300 грамм для варианта POS-1 с расширенным диапазоном измерений 30000-180000 нТл. Учитывая малый вес нового оверхаузеровского датчика, имеется перспектива развития для создания трёхосных аэроградиентометров коптерного типа, аналогичного морскому 3D градиентометру (Narkhov et. al., 2019). Ключевые узлы датчика, зарекомендовавшие себя по долговечности и метрологии, а именно оверхаузеровская ампула, состоящая из коаксиального стеклянного вакуумированного сосуда, заполненного рабочим веществом и смонтированного поверх него высокочастотного резонатора, были сохранены в новой модификации POS-1aero.

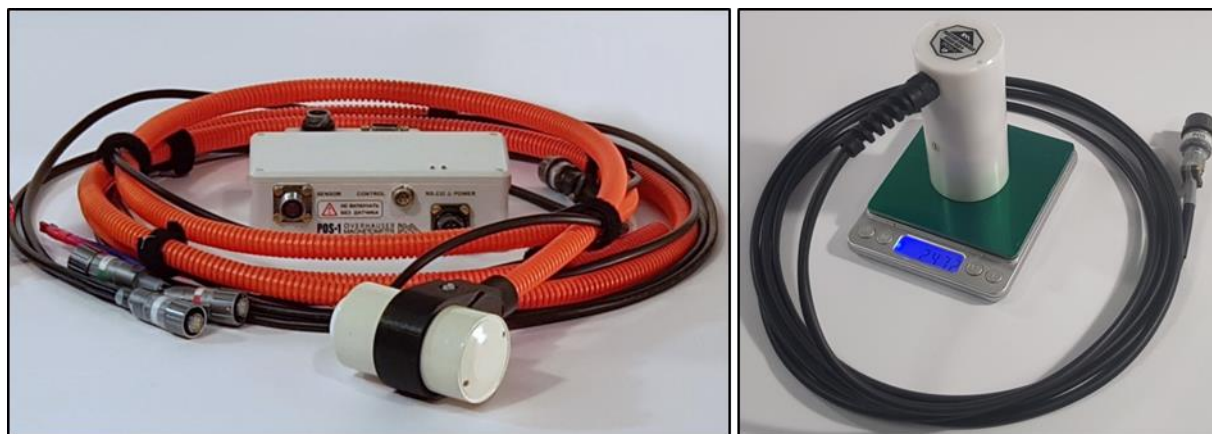


Рисунок 1. Комплект POS-1aero, включающий блок электроники со светодиодной индикацией записи измерений встроенного регистратора с USB выходом (флэш карта).

На рис.1 следует обратить внимание на оранжевую трубу, используемую для подвеса датчика – это, так называемый, полужёсткий антигироскопический подвес, обеспечивающий исключение вращения датчика. Для протонных прецессионных магнитометров известен гироскопический эффект (аналог эффекта Доплера), когда к вектору угловой прецессии протонов добавляется

вектор углового вращения датчика, что приводит к изменениям показаний магнитометра. В северных широтах, где вектор поля почти параллелен оси подвеса датчика, данный эффект может достигать 23 нТл при частоте углового вращения 1 Герц. Кстати, данный эффект многократно меньше в магнитометрах на принципе оптической ориентации атомов, т.к. частота прецессии многократно выше (Kimball et. al., 2011)

Для инициализации, контроля и визуализации непрерывных измерений POS-1аего используется программное обеспечение POSmanager, показанное на рис. 2.

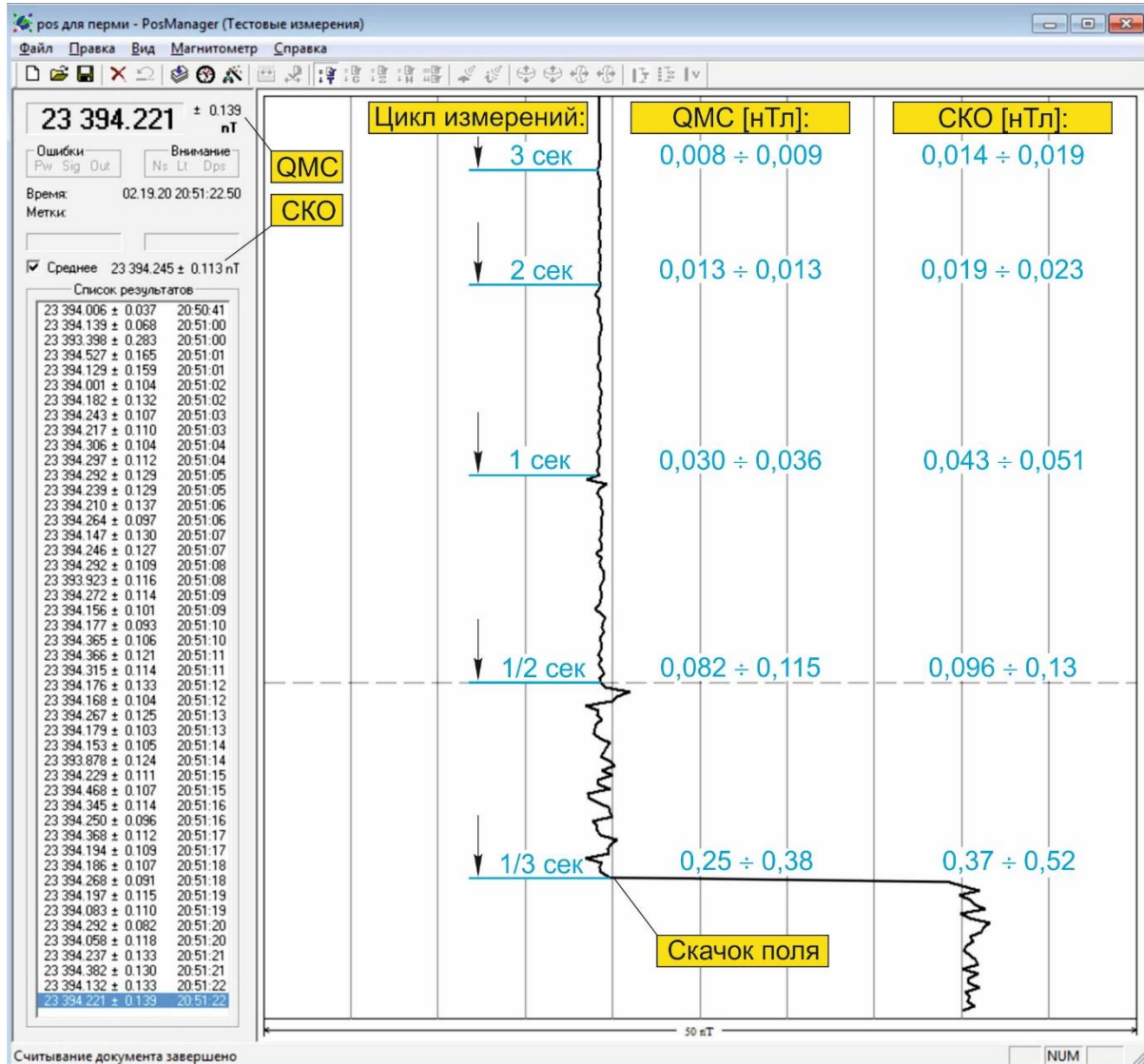


Рисунок 2. Программное обеспечение POSmanager с демонстрацией реальных измерений поля при различных циклах измерений (поясняющие надписи нанесены отдельно). Созданный «скачок поля» показывает динамическую характеристику (независимость измерений). Горизонтальная пунктирная линия соответствует выделенному тексту в колонке измерений.

При инициализации измерений время устанавливается по часам компьютера, выбирается цикл измерений, стартовый диапазон измерений, который потом автоматически подстраивается по командам процессора POS-1аего. Встроенный регистратор POS-1аего сохраняет измерения в текстовом формате совместимом с ПО POSmanager, что позволяет просматривать и анализировать полученные данные. Фиксируется поле и QMC в пикотеслах, колонка кода ошибок, дата и время.

Рис.2 демонстрирует пример записи в лабораторном магнитоэранированном эталоне слабого поля (Sergeev et. al., 2019; Sapunov et. al., 2015) при циклах измерений 3,2,1,½,1/3 секунд. Отметим, что несовпадение QMC и СКО при медленных циклах 2-3 секунды говорит о недостаточной стабильности поля в нашем эталоне. Продемонстрирован заданный скачок поля, инициированный переключением тока в источнике стабильного тока, показывающий отсутствие динамической погрешности, т.е. каждое измерение независимо от предыдущего, в отличие от большинства феррозондовых и оптических квантовых магнитометров, использующих межцикловую обработку (усреднение). Пользователь POS-1аего может самостоятельно выбирать алгоритмы (фильтры) межциклового усреднения для повышения чувствительности на быстрых циклах при постобработке в соответствии с допустимой динамической погрешностью. Кстати, отклик (переходная характеристика) и тестирование на скачок поля является стандартным требованием IAGA для феррозондовых магнитометров-вариометров, используемых на магнитных обсерваториях.

На рис. 2, демонстрирующем ПО POSmanager, рядом с окном текущего измерением и во второй колонке файла данных представлен параметр, не имеющего аналога в конкурирующих магнитометрах, а именно - параметр контроля чувствительности каждого отдельного измерения (QMC – quality measurement condition). QMC рассчитывается в единицах поля нТл на основе анализа дисперсии длительностей периодов сигнала прецессии. В отсутствии импульсных промышленных помех параметр QMC близок к среднеквадратическому отклонению измерений (СКО). Это является одной из функций процессора обработки в магнитометрах POS (Denisov et al., 2006) помимо расчёта поля методом внутрициклового обработки (Denisov et. al., 1999), управлением временем регистрации сигнала для повышения градиентоустойчивости (Sapunov et. al. 2015), формирования сообщений о состоянии прибора и управления диапазоном измерений входного резонансного контура датчика.

Измерения, продемонстрированные на рис.2, сделаны с магнитометром, который имеет стандартное время релаксации 0,7-1 сек. (время затухания свободной прецессии в отсутствии градиента поля) для серийных магнитометров POS-1. Данное время измеряется на специализированном лабораторном устройстве при аналоговой оцифровке сигнала с помощью специального ПО, представленном на рис.3.

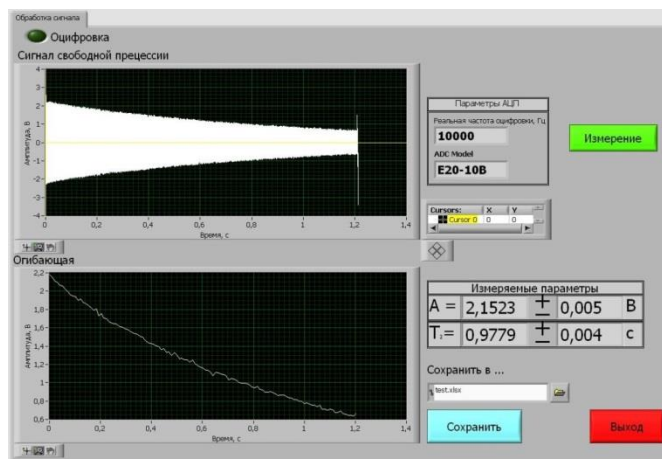


Рисунок 3. Программное обеспечение «ЯМР релаксометр» предназначенное для определения амплитуды и времени затухания сигнала прецессии магнитометров POS.

Для повышения быстродействия и чувствительности на быстрых циклах работы приходится повышать концентрацию радикала в рабочем веществе оверхаузеровского датчика, уменьшая времена продольной и поперечной магнитной релаксации на соответствие оптимальным условиям. Концентрация радикала и времена релаксации (продольное T_1 для поляризации вещества и поперечное T_2 , соответствующее экспоненциальному уменьшению сигнала прецессии) предварительно контролируются с помощью ЭПР-спектроскопии, ЯМР

релаксометра сильного поля и упомянутого выше POS-релаксометра (Ushakov et. al., 2019). Непосредственно рабочее вещество является оригинальным отечественным продуктом, отличающееся рекордной стабильностью более 10 лет и способностью обеспечивать повышенную протонную намагниченность в малых объёмах в отличие от канадских аналогов [Sapunov et. al. 2015; Sapunov et. al., 2019].

В таблице 1 представлены результаты метрологических испытаний для POS-1 с временем релаксации рабочего вещества 0,35 секунд, позволяющее улучшить чувствительность при быстрых циклах измерений, начиная с ½ секунды. К сожалению, при этом теряется чувствительность для медленных циклов, т.к. длительность сигнала ограничена (оптимальным является регистрация сигнала прецессии при уменьшении сигнала не более 3-5 раз). Отметим, что в магнитометре POS-1 реализована так называемая синхронная поляризация, когда остаток прецессирующей намагниченности протонов используется в цикле поляризации последующего цикла поляризация-измерение.

Таблица 1. Чувствительность оверхаузеровского магнитометра POS-1 повышенного быстродействия в зависимости от цикла измерений и ориентации датчика.

Цикл измерений, сек	Ориентация датчика	СКО, нанотесла	QMC, пикотесла	Амплитуда сигнала, Вольт
3	90°	0,03	28-35	2,0
	45°	0,08	60-70	1,1
2	90°	0,04	35-45	1,8
	45°	0,08	60-70	1,0
1	90°	0,05	35-45	1,5
	45°	0,08	65-85	0,84
1/2	90°	0,1	90-120	1,2
	45°	0,15	140-180	0,65
1/3	90°	0,25	200-300	1,0
	45°	0,45	350-500	0,61

Стандартный датчик POS-1 является ориентируемым, имеющим мёртвую зону при направлении вектора по оси цилиндра датчика (0°), т.е. относительно внутренних включённых встречно приёмно-поляризующих соленоидов, обеспечивающих помехоустойчивую схему. В первом приближении сигнал прецессии уменьшается как квадрат синуса угла между осью цилиндра датчика и вектором геомагнитного поля, хотя, благодаря неоднородности поляризующего поля, наблюдается сигнал и низкоточные отчёты магнитометра даже при параллельном расположении (уменьшение параметров до 10 раз). В северных широтах предполагается, что датчик всегда сориентирован оптимально при его горизонтальном расположении. В таблице 1 представлены также результаты для нормируемого по ТЗ угла 45°. Разработан вариант неориентируемого (изотропного) датчика, но он используется только в скважинных магнитометрах LOM-2, ввиду его трудоёмкости и повышенной стоимости, поэтому не предлагается в составе POS-1аего без индивидуального заказа.

В электронном блоке POS-1аего предприняты меры для понижения микрофонного эффекта в усилителе сигнала протонной прецессии, который аналогично импульсным помехам электродвигателей БПЛА может снижать чувствительность измерений. Для этих же целей блок электроники должен крепиться в мягком подвесе на БПЛА. Также требуются исследования по электромагнитной совместимости с БПЛА, особенно при питании от набортных источников. Параметр QMC позволяет оценивать ситуацию при испытательных полётах, а также имеется выход сигнала прецессии для осциллографического контроля при наземных испытаниях.

Исследование метрологических параметров магнитометров является достаточно сложной задачей, требующей специального оборудования. В лаборатории квантовой магнитометрии для этих целей используется магнитоэкранированный источник слабого магнитного поля,

состоящий из четырёхслойного экрана из пермаллоя 79НМ с установленным внутри соленоидом ($\varnothing 220 \times 1500$ мм) с питанием от высокостабильных источников постоянного тока, в частности, программируемого калибратора П321. Осуществляется калибровка испытуемых магнитометров относительно эталонного магнитометра, который калибруется, в свою очередь, на государственном эталоне слабого магнитного ВНИИМ им. Д.И Менделеева (Shifrin et. al., 2012). Эталонным магнитометром является один из первых серийных POS-1 изготовленный более 15 лет назад. Фрагмент действующего свидетельства о поверке представлен на рис. 4.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. Результаты поверки магнитометра приведены в таблице.
Вд - действительное значение измеряемой магнитной индукции.
Поправка $\Delta = (V_{90} + V_{270})/2$ - среднее, измеренное магнитометром значение магнитной индукции, равное полусумме результатов измерений, полученных при углах 90° и 270° между направлениями магнитного поля и осью датчика; СКО - стандартная неопределённость типа А единичного измерения.

Таблица

№	Вд, нТл	Поправка Δ , нТл (прибавлять к показаниям магнитометра со своим знаком)	СКО (случайное), нТл
1	15000	-0,5	0,06
2	20000	-0,1	0,02
3	30000	0,1	0,007
4	40000	0,2	0,006
5	50000	0,2	0,005
6	60000	0,3	0,007
7	70000	0,3	0,008
8	80000	0,3	0,008
9	90000	0,4	0,01
10	100000	0,4	0,02

2. Изменение показаний магнитометра при повороте оси датчика на 180° составляет 0,1 нТл.
3. Магнитометр пригоден для применения в качестве рабочего средства измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от 15000 до 100000 нТл с характеристиками, приведенными в пп. 1-2.

Владелец СИ:
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург, ИНН 6660003190.

Рисунок 4. Метрологические характеристики эталонного магнитометра POS-1 лаборатории квантовой магнитометрии УрФУ используемого при тестировании POS-1аero.

Выводы

Представленная модификация протонного оверхаузеровского магнитометра POS-1 перспективна для универсального использования в наземных условиях в качестве автономной вариационной станции и для аэромагниторазведки на БПЛА коптерного типа. Магнитометр POS-1аero способен обеспечить чувствительность 0,03-0,3 нТл при цикличности измерений 1-1/3 секунд при абсолютной точности до 1 нТл с накоплением привязанных по времени непрерывных измерений. Учитывая малый вес нового оверхаузеровского датчика, имеется перспектива развития для создания трёхосных аэроградиентометров коптерного типа.

Благодарности

Авторы благодарят за совместную работу, натурные испытания и ценные замечания Юрия Давыденко и Александра Паршина (Технопарк ИРНИТУ), а также Некоммерческую организацию Фонд «Екатеринбургский центр развития предпринимательства» и Комитет промышленной политики и развития предпринимательства Администрации города Екатеринбурга за предоставленный гексакоптер DJI M600Pro. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по постановлению № 211 Правительства РФ (контракт № 02.А03.21.0006, УрФУ, НГ «Квантовые оверхаузеровские методы, вещества и аппаратура»).

References

- Denisov, A.Y., Denisova, O.V., Sapunov, V.A. and Khomutov, S.Y. [2006] Measurement quality estimation of proton-precession magnetometers. *Earth, Planets and Space*, **58**(6), 707–710.
- Denisov, A.Yu., Sapunov, V.A. and Dikumar, O.V. [1999] Calculation of the error in the measurements of a digital-processor nuclear-precession magnetometer. *Geomagnetism and Aeronomy*, **39**(6), 737–742.
- Johnson, R. [2013] Geophysical instruments for land, sea and air - Subsurface investigations Hydro International Volume 17, Issue 5, July 2013
- Kimball, D.F., Alexandrov, E.B. and Budker, D. [2011] General principles and characteristics of optical magnetometers. *Optical Magnetometry*, 9781107010352, 3–24
- Narkhov, E., Shirokov, A., Sergeev, A., Fedorov, A., Milukov, D., Sapunov, V., Denisov, A., Kiselev, S., Savelev, V., Muravyov, L. and Ivanenko, A. [2019] Overhauser four-channel 3D gradiometer and its application for scanning the underwater gas pipeline. *Marine Technologies 2019*, Gelendzhik, 169–179.
- Sapunov, V.A., Narkhov, E.D., Fedorov, A.L., Sergeev, A. and Denisov, A.Y. [2015] Ground Overhauser DNP geophysical devices. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. *SGEM*, 215–222.
- Sapunov, V.A., Kashin, I.V., Ushakov, V.A., Sergeev, A.V. and Denisova, O.V. [2019] Little-known aspects of overhauser DNP at zero and low magnetic fields stimulated by parallel electron pumping of nitroxide radicals solutions. *AIP Conference Proceedings*, **2174**, No.020112.
- Sapunov, V., Denisov, A., Savelev, V., Denisova, O., Yaroshenko, S., Muravyev, L., Narkhov, E., Sergeev, A., Fedorov, A. and Gladyshev, V. [2019] Proton overhauser magnetometers: Theory and experimental study of the ship magnetic influence. *Marine Technologies 2019*, 302–311.
- Sapunov, V., Narkhov, E., Denisov, A., Wu, T. and Cao, X. [2015] A gradient tolerance measurement method of borehole overhauser magnetometer LOM-2 in laboratory condition. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, *SGEM*, 29–36
- Sergeev, A.V., Denisov, A.Y., Narkhov, E.D., Fedorov, A.L. and Sapunov, V.A. [2019] Magnetically shielded highly homogeneous systems development using Comsol Multiphysics. *AIP Conference Proceedings*, **2174**, No.020169.
- Shifrin V.Y., Khorev V.N., Kalabin V.N., Voronov S.L. and Shilov A.E. [2012] State standards: State primary standard for the units of magnetic induction, magnetic flux, magnetic moment, and magnetic induction gradient. *Measurement Techniques*, **55**(7), 739–744
- Ushakov, V.A., Denisov, A.Y., Sergeev, A.V., Narkhov, E.D. and Sapunov, V.A. [2019] Geomagnetic field NMR relaxometer to monitor the working substance, sensor and electronics of the POS-1 Overhauser magnetometer. *AIP Conference Proceedings*, **2174**, No.020261.
- Veloski, G.A., Hammack, R.G., Sams, J.I., Wylie, L.D. and Heirendt, K. [2018] Evaluation of the micro-fabricated atomic magnetometer deployed from a small autonomous rotorcraft for locating legacy oil & gas wells (Conference Paper) Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP Volume 2018-March, 31st Symposium