

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЕГО ЕСТЕСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЙ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАКЛОННОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Богоутдинов Ш.Р.
Геофизический центр РАН (ГЦ РАН, Москва, Россия)
adg@wdcb.ru

1. Введение

Технология направленного бурения скважин развивалась на протяжении нескольких последних десятилетий, и в настоящее время является стандартной оперативной практикой в нефтегазодобывающей промышленности. Современные технологии позволяют строить скважины, которые практически горизонтально входят в нефтеносный слой и могут достигать резервуаров, расположенных за несколько километров от исходной точки бурения, в том числе под морским дном на большом удалении от берега.

Технология наклонно-направленного бурения требует непрерывного контроля ориентации буровой колонны под землей. Строгое следование заданному направлению необходимо для достижения нефтеносного слоя, а при проводке скважин кустами - для соблюдения условий непересечения стволов скважин. Для измерения зенитного угла и географического азимута применяются скважинные измерительные системы с использованием гироинклинометров или приборов, измеряющих магнитное и гравитационное поле Земли. Несмотря на все измерительные достоинства гироинклинометров, они имеют относительно низкую вибро- и ударо-прочность, вследствие чего их затруднительно использовать в буровом забойном оборудовании. Для их корректной работы требуется отсутствие вибрационных помех, т.е. фактически остановка работы буровых двигателей. Магнитометрическая технология является значительно более экономичной, чем ориентация с применением гироскопов, так как магнитные инклинометры гораздо более стабильны и могут использоваться в качестве забойных навигационных систем. Однако при геомагнитном сопровождении наклонно-направленного бурения в Арктическом регионе возникают проблемы, которых нет в регионах, расположенных в более низких географических широтах. Эти проблемы во многом связаны со строением магнитного поля Земли и мощными спорадическими возмущениями геомагнитного поля во время магнитных бурь. Коррекция магнитометрических данных и стабильное определение заданного направления бурения является актуальной задачей.

Необходимость организации наблюдений за геомагнитным полем и корректной интерпретации результатов измерений обусловили развитие тесного сотрудничества между компаниями нефтегазового сектора и научными организациями, которые занимаются геомагнитными исследованиями. В мировой практике большой опыт таких совместных работ имеют научные подразделения Британской геологической службы (BGS), Американской геологической службы (USGS), Канадского министерства природных ресурсов (NRC), Арктического университета Норвегии (UiT) и ряда других. В Российской Федерации научный проект по исследованию геомагнитного поля и разработке методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе в рамках программы

фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны РФ» осуществляется научным коллективом Геофизического Центра РАН, который занимается изучением геомагнитного поля, организацией наблюдений, разработкой методов анализа данных измерений.

Цели выполняемого в ГЦ РАН проекта по исследованию геомагнитного поля в Арктическом регионе состоят в разработке научных основ и создании технологического задела в области геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения скважин в арктической зоне РФ, исследовании спорадических геомагнитных вариаций и эволюции внутреннего магнитного поля Земли в арктическом регионе, оценке влияния аномалий магнитного на точность подземной навигации в целях адаптации методов коррекции скважинной телеметрии для условий российской Арктики. Полный спектр работ включает в себя теоретические (изучение локальных аномалий и вариаций геомагнитного поля в арктическом регионе) и прикладные (методические и технологические работы по развертыванию обсерваторий) задачи.

2. Контроль траектории бурения

Глубины типичных нефтяных и газовых скважин – от 2 до 4 км по вертикали. Обычно разведочные скважины бурятся вертикальными, а эксплуатационные (добывающие или нагнетательные) – наклонно-направленными или даже горизонтальными. В последнем случае забойные двигатели ориентируют в скважине по определенному азимуту, и бурение идет в строго заданном направлении. Постепенно набирается зенитный угол вплоть до 90° , и ствол скважины становится горизонтальным. Бывает, что набирается еще больший угол, и тогда ствол называется «восстающим».

Геомагнитное поле имеет большое значение в технологии наклонно-направленного и горизонтального бурения. Определение направления в пространстве под землей осуществляется с помощью непрерывных измерений элементов геомагнитного поля: магнитного склонения, наклонения, а общей напряженности (полного вектора) поля. По известным значениям магнитных элементов можно однозначно определить направление на истинный северный полюс, а также оценить величину отклонения от вертикали. В скважине измерения производятся компонентным скважинным магнитометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны (Рис.1). В любой точке вектор геомагнитного поля \mathbf{B} можно разложить три ортогональные компоненты (элемента): X (направлена на север), Y (на восток) и Z (вертикаль, направленная к югу) или на компоненты H (на северный магнитный полюс), Z и угловую компоненту магнитного склонения D (Declination - угол между географическим и магнитным меридианами) [1]. Еще одним элементом геомагнитного поля является магнитное наклонение I (Inclination - угол между горизонтальной составляющей и направлением полного вектора). По известным значениям магнитных элементов D и I можно однозначно определить направление на истинный северный полюс (географического азимут) и величину отклонения от вертикали. Скважинный магнитометр входит в систему телеметрического контроля, которая носит название «Измерения в процессе бурения» или MWD (Measurements While Drilling), и широко используется при проведении буровых работ и строительстве скважин во всех географических зонах.

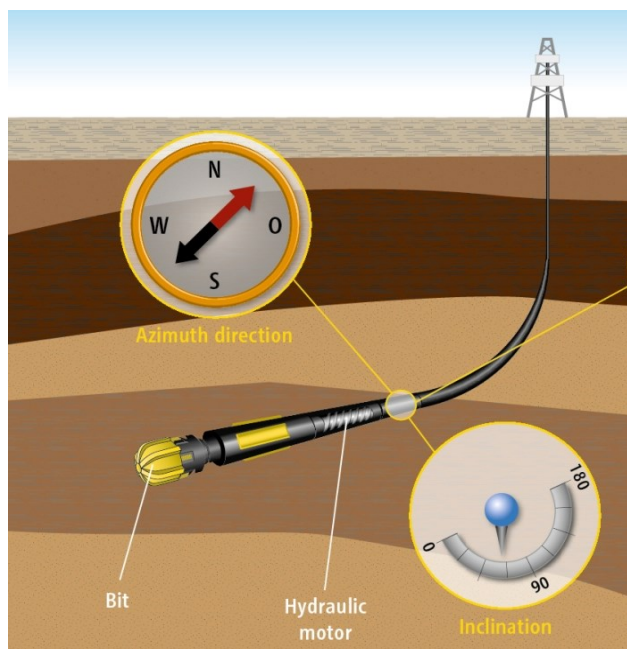


Рис.1 Ствол наклонно-направленной скважины, буровой инструмент и измерительные приборы для контроля заданного направления по магнитному склонению и азимуту (<http://www.rwe.com/web/cms/en/1475776/rwe-dea/know-how/drilling/measuring-equipment/>)

Принятые в нефтегазовой промышленности стандарты точности определения параметров геомагнитного поля составляют 0.1° для магнитного склонения D , 0.05° для магнитное наклонения I и 50 нТл для модуля полного вектора геомагнитного поля F . Эти проблемы связаны со строением магнитного поля Земли. В Арктике величина I превышает 80° , т.е. силовые линии магнитного поля Земли направлены почти вертикально, а горизонтальная составляющая невелика. Поэтому любые естественные и техногенные аномалии магнитного поля оказывают существенное влияние на показания магнитометра и вносят дополнительную, часто значительно превышающую допустимые значения, погрешность в показания телесистемы MWD. В Арктике в работе скважинного магнитометра появляются помехи, приводящие к ошибкам определения горизонтального направления, которые могут во много раз превышать допустимые значения. Поэтому остро стоит вопрос о точности измерения геомагнитного поля и обоснованной коррекции показаний скважинной магнитометрической телеметрии. Основной причиной возникновения помех в системе MWD в высоких широтах являются мощные геомагнитные возмущения - геомагнитные бури, связанные с солнечной активностью.

3. Магнитное поле Земли

Геомагнитное поле характеризуется неоднородной пространственной структурой и широким спектром временных вариаций. Это объясняется тем, что оно создается за счет источников различной природы, расположенных внутри Земли, а также в магнитосфере и ионосфере. Проблемы стабилизации заданного направления бурения скважин в полярных регионах связаны со строением внутреннего магнитного поля Земли, его взаимодействием с солнечным ветром и короткопериодными спорадическими вариациями геомагнитного

поля во время магнитных бурь, источники которых находятся на высоте более ста километров от поверхности Земли.

Внутреннее поле. Магнитное поле Земли имеет дипольную конфигурацию. Главные его источники находятся внутри земного шара: в жидком ядре и мантии. Локальные геологические структуры могут несколько искажать это крупномасштабное поле. Вклад внутреннего, медленно изменяющегося во времени поля в полный вектор магнитной индукции, наблюдаемый на поверхности Земли, составляет более 95%. У полюсов, где вектор поля ориентирован перпендикулярно земной поверхности, величина магнитной индукции составляет порядка 60000 наноТесла (нТл), а в районе экватора, где вектор направлен горизонтально – около 30000 нТл. Между полюсом и экватором вектор геомагнитного поля ориентирован под углом к земной поверхности, то есть имеет и горизонтальную, и вертикальную составляющие. Так, на широте 65°N в Норвежском море, величина полного вектора поля составляет примерно 52000 нТл, а азимутальная (горизонтальная) составляющая этого вектора – около 11000 нТл. На Аляске, на 70° с.ш. полный вектор равен 53000 нТл, а азимутальная составляющая – примерно 8000 нТл. Для определения значений главного магнитного поля Земли в любой заданной точке земного шара в указанное время применяются статистические модели, ассимилирующие данные наземных обсерваторских и специальных магнитных спутниковых наблюдений. Наиболее известной является модели серии IGRF (International Geomagnetic Reference Field, Международная геомагнитная опорная модель), которые основаны на математическом методе сферического гармонического анализа [2]. Обновление коэффициентов в очередной версии модели IGRF происходит каждые 5 лет и утверждается Международной Ассоциацией Геомагнетизма и Аэронавтики (IAGA, International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Однако большинство нефтегазовых компаний, работающих в Европе, в частности в Северном море и других приарктических регионах, использует коммерческую модель Британской геологической службы BGGM (British Global Geomagnetic Model, Британская глобальная геомагнитная модель). Эта модель обновляется ежегодно.

Данные реальных наблюдений магнитных обсерваторий, расположенных в различных точках земного шара, в той или иной степени отличаются от модельных данных. Для составления уточненных карт региональных магнитных аномалий литосферного происхождения (пространственный масштаб 1–1000 км) используются дополнительные данные спутниковых, аэромагнитных измерений и магнитной съемки. Разрабатываются общемировые модели и карты магнитных аномалий, такие как семейство моделей CM (Comprehensive Model, Комплексная модель) [3], которые основаны на обобщенных данных четырех геомагнитных спутников, или модель WDMAM (World Digital Magnetic Anomaly Map, Мировая цифровая карта магнитных аномалий) [4]. Карты крупномасштабного магнитного поля и карты, построенные с использованием данных магнитной съемки на территории СССР в 1950–1990 гг., собраны в Атласе магнитного поля [5, 6].

Внешнее поле. Земной диполь находится под постоянным воздействием исходящего от Солнца сверхзвукового потока заряженных частиц – так называемого солнечного ветра. Набегание потока приводит к тому, что на стороне, обращенной к Солнцу, силовые линии земного диполя поджимаются, а на ночной стороне, наоборот, вытягиваются (Рис. 2). Пограничные области магнитосферы Земли заполняются энергичной плазмой, которая проникает в верхние слои атмосферы высокоширотных

областей Земли и вызывает появление полярных сияний и возмущений геомагнитного поля.

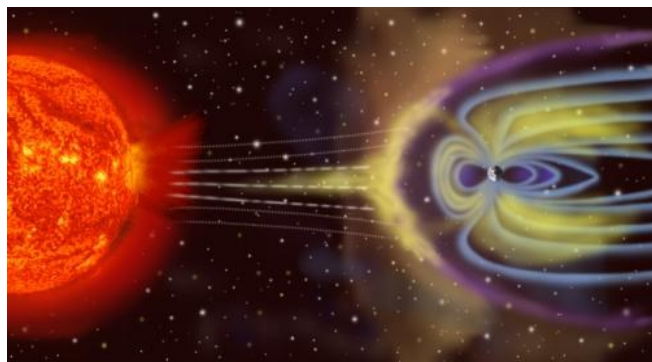


Рис. 2. Магнитное поле Земли под воздействием потоков солнечного ветра (NASA)

Источники магнитного поля находятся не только внутри Земли, но и в околоземном пространстве. Источником внешнего магнитного поля является сложная и изменчивая трехмерная система электрических токов, текущих в магнитосфере и ионосфере Земли. Магнитный эффект этих токов наблюдается на Земле в виде регулярных вариаций (суточных и сезонных) и спорадических флуктуаций на временных масштабах от многочасовых до секундных отклонений от спокойного уровня. Короткопериодные флуктуации, связанные с токовыми системами магнитных бурь, суббурь и других нестационарных явлений формируют геомагнитную активность. Мощные бури с резким началом и длительностью 1–2 дня происходят обычно в годы максимума 11-летнего солнечного цикла, когда бывает много солнечных вспышек. Для фазы спада солнечного цикла характерно появление на Солнце долгоживущих коронарных дыр и высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые вызывают продолжительные многодневные бури сравнительно меньшей интенсивности. Но во время таких бурь резко усиливается суббуревая активность [7]. Во время магнитных суббурь в ионосфере Земли развиваются мощные, до десятков миллионов Ампер, и очень изменчивые электрические токи. Самые интенсивные токи текут в ионосфере на высоте около 120 км и локализованы в виде струй вдоль широтных кругов $65\text{--}75^\circ$ (в авроральной зоне) как в северном, так и в южном полушариях.

При низкой солнечной активности вклад внешнего поля в общее наблюдаемое магнитное поле не превышает долей процента. Во время магнитных бурь амплитуда флуктуаций резко возрастает и, в зависимости от компоненты поля и широты, вклад может составить десятки процентов. Во время магнитных бурь средней интенсивности амплитуда наземных магнитных вариаций в Арктике от авроральных ионосферных электрических токов достигает 1000 нТл. При экстремальных магнитных бурях могут наблюдаться отклонения азимутальной компоненты вектора геомагнитного поля в 4000 и более нТл (Рис. 3). В магнитовозмущенные периоды в авроральной зоне амплитуда спорадических вариаций горизонтальной компоненты внешнего геомагнитного поля может быть сравнима по величине с главным геомагнитным полем, по которому осуществляется навигация подземного скважинного рабочего инструмента. Вследствие этого вариации внешнего поля вносят большую неопределенность в показания магнитометра MWD, которые должны быть оперативно скорректированы.

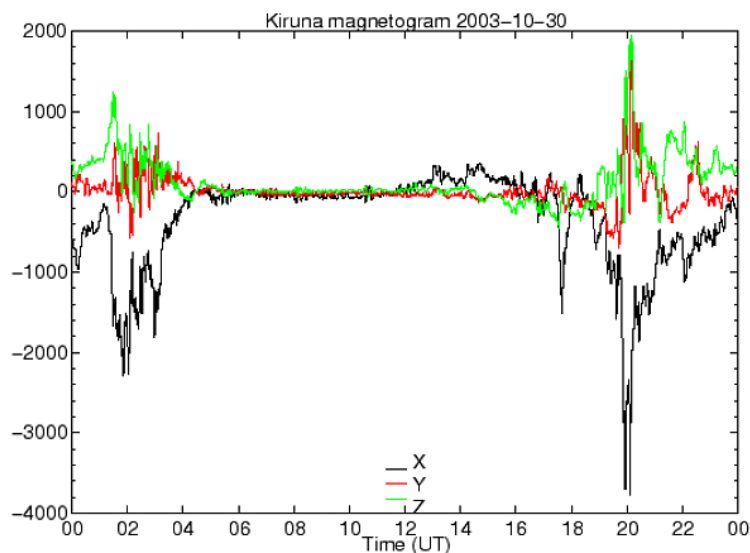


Рис. 3. Вариации трех ортогональных компонент внешнего геомагнитного поля X , Y , Z во время магнитной бури 30 октября 2003 г (обсерватория Кируна, 67.8° с.ш.).

Быстро меняющееся внешнее магнитное поле возбуждает в поверхностных слоях Земли, теллурические токи. Магнитное поле этих токов также вносит дополнительную погрешность в определение заданного направления бурения. Магнитные помехи возникают и вследствие нескомпенсированных наводок внутри самого бурового инструмента и проводящей буровой жидкости.

Частота и интенсивность магнитных бурь зависит от фазы 11-летнего солнечного цикла. В годы активного Солнца геомагнитные возмущения в Арктике – типичное явление. Любопытно отметить случайное совпадение по времени двух символических событий. Считается, что мировая история освоения месторождений нефти и газа началась 27 августа 1859 г., когда Эдвин Дрейк пробурил в Пенсильвании первую нефтяную скважину. А буквально на следующий день, 28 августа 1859 г., произошла самая мощная из известных солнечных вспышек, вызвавшая магнитную бурю исключительной интенсивности, во время которой полярные сияния наблюдались даже на Кубе и в австралийском штате Квинсленд. Была полностью нарушена телеграфная связь в Европе и Северной Америке. Вероятность таких «супер-бурь» оценивается как один раз в 500 лет. В середине позапрошлого века вряд ли кто-то задумывался о том, что геомагнитная активность может быть как-то связана с нефтедобычей. Между тем, случись магнитная буря такой интенсивности сейчас, буровые работы в Арктике были бы вынужденно приостановлены, так как вариации внешнего геомагнитного поля были бы столь велики, что контролировать направление было бы невозможно.

3. Сеть наблюдений геомагнитного поля в Арктике

Для коррекции телеметрических магнитных данных, поступающих из места нахождения буровой колонны, применяется одновременный параллельный независимый мониторинг геомагнитного поля на поверхности Земли. Точные и надежные значения полного вектора геомагнитного поля и его элементов можно получить только на хорошо оснащенных геомагнитных обсерваториях. Необходимость устройства обсерваторий, их

методическая поддержка, организация и выполнение измерений – это задача, в решении которой важную роль играет кооперация между геофизической наукой и нефтегазовыми компаниями. Из-за сложности установки и функционирования в суровых условиях количество обсерваторий в Арктике весьма ограничено и не удовлетворяет существующих потребностей. Развертывание новых обсерваторий, особенно в приарктических регионах РФ, сбора, хранения, обработки и научного анализа информации является одной из задач, решаемых ГЦ РАН [8, 9]. В российском секторе Арктики работает также ряд магнитовариационных станций (МВС), обслуживаемых Росгидромет, которые измеряют вариации магнитных элементов.

На карте, представленной на Рис 4, можно видеть более двадцати действующих в арктическом регионе магнитных обсерваторий, которые, являясь национальными, входят в мировую сеть обсерваторий реального времени ИНТЕРМАГНЕТ (International Real-time Magnetic Observatory Network, INTERMAGNET). ИНТЕРМАГНЕТ представляет на сегодняшний день высший стандарт качества геомагнитных измерений полного цикла, который удовлетворяет запросам промышленных потребителей. ИНТЕРМАГНЕТ был образован более 20 лет для обеспечения нефтяных компаний информацией о состоянии магнитного поля по региону Северного моря. В настоящее время включает в себя более 100 обсерваторий. Старейшая полярная магнитная обсерватория расположена в Соданкюля (SOD), Финляндия. Некоторые обсерватории, например, на Аляске построены сравнительно недавно именно с учетом нужд нефтегазовых компаний.

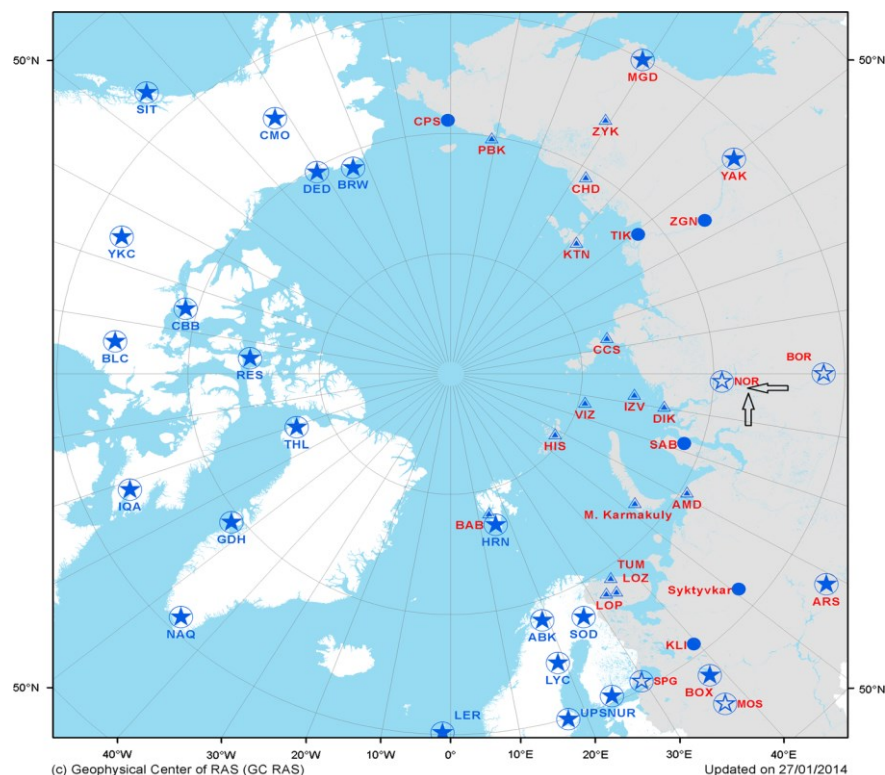


Рис. 4. Магнитные обсерватории, действующие в Арктическом регионе севернее 60°N. На территории РФ обозначены действующие обсерватории (синие контурные звездочки), в том числе входящие в ИНТЕРМАГНЕТ (синие звездочки), обсерватории, готовящиеся к вводу в эксплуатацию (синие точки) и МВС (треугольники).

4. Методы коррекции с учетом главного, литосферного и внешнего геомагнитного поля в условиях российской Арктики

Работы по освоению больших запасов углеводородного сырья начаты на севере Западной Сибири в Ямало-Ненецком автономном округе. В настоящее время сеть геомагнитных наблюдений в регионе для обеспечения сопровождения навигационного оборудования в процессе бурения развита недостаточно и не удовлетворяет потребностям промышленных пользователей. Так, в регионе нет ни одной магнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Ближайшая российская обсерватория находится в Норильске, при этом она имеет ряд недостатков, не позволяющих поставлять стабильные и качественные данные. Наблюдательная сеть представлена только несколькими МВС, которые не обеспечивают непрерывного ряда измерений. Также фактически не проводилось теоретического обоснования применения в регионе принятых в мировой практике методов геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения, таких как IFR и IIFR, адаптации этих методов к региону и оценок результатов их работы. Весьма приблизительно известны региональные и локальные характеристики внутреннего геомагнитного поля, статистические характеристики внешнего геомагнитного поля и недостаточно изучено их влияние на точность подземной навигации.

Методика определения координат с учетом главного магнитного поля Земли и поля литосферных магнитных аномалий носит название «Привязки к месту» (In-Field Referencing, IFR), а если учитываются и вариаций внешнего геомагнитного поля, то «Интерполяционной привязки к месту» (Interpolation In-Field Referencing, IIFR). Основы методики были разработаны Британской геологической службой (BGS) совместно с сервисной компанией Sperry-Sun Drilling Services. Это позволило успешно осуществить внедрение данной технологии в нефтегазовую отрасль. В настоящее время с использованием IIFR буровые работы производятся в приарктической зоне Европы и Америки, на морском шельфе северных морей. Для обеспечения геомагнитных наблюдений развернут ряд геомагнитных обсерваторий, которые производят минутные данные и поставляют их потребителям с задержкой не более 10 минут.

Для коррекции телеметрических магнитных данных, поступающих из места нахождения бура, применяется одновременный параллельный мониторинг геомагнитного поля на поверхности Земли с помощью высокоточного инструментария магнитных обсерваторий, развернутых в районе проведения работ. Точные и надежные значения полного вектора геомагнитного поля и его составляющих в режиме реального времени можно получить только с помощью хорошо оснащенных современных геомагнитных обсерваторий. Но при этом магнитометрическая аппаратура должна находиться вне техногенных помех, которые всегда присутствуют вблизи производства буровых работ. Как правило, обсерватории располагаются на некотором удалении, и для коррекции показаний системы MWD решается задача математической интерполяции данных одной или нескольких ближайших обсерваторий.

4.1 Главное магнитное поле и локальные аномалии в регионе

Глобальные модели учитывают только ряд первых гармоник геомагнитного поля. Локальные магнитные аномалии могут быть измерены на месте с помощью аэромагнитной, морской и наземной магнитной съемки. При наземных измерениях определяется напряженность магнитного поля и его элементы (I , D , Z) в

непосредственной близости от локации. Аэромагнитная и морская съемка дают только значения напряженности поля. Если специальные работы по съемке не проводились, то используются мировые карты магнитных аномалий, построенные с ассимиляцией спутниковых магнитных измерений.

На Рис. 5 представлены изолинии магнитного элемента D для северных и восточных регионов РФ (Рис. 5а) и карта напряженности магнитных аномалий для региона п-ова Ямал (Рис. 5б), построенные соответственно по моделям IGRF и WDMAM.

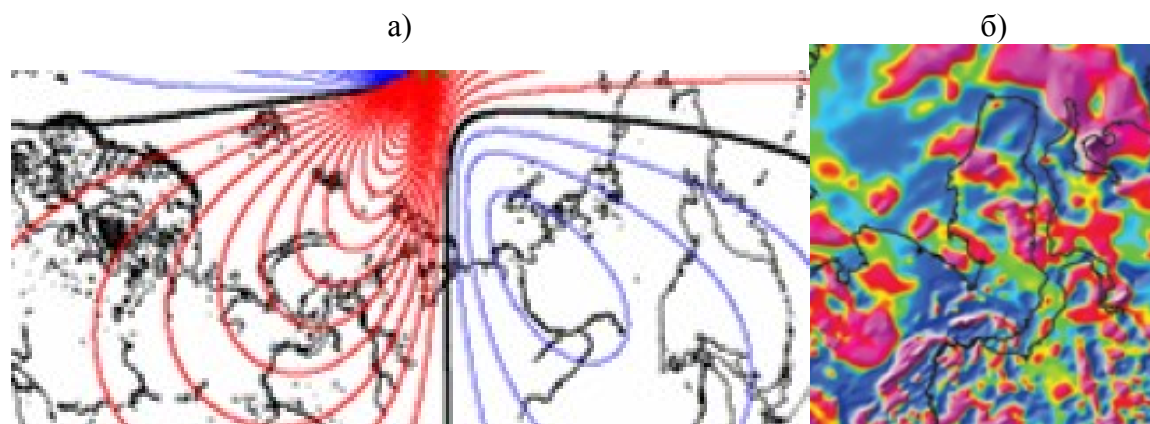


Рис. 5. Изолинии D для для северных и восточных регионов РФ (а) и карта напряженности магнитных аномалий для п-ова Ямал (б), построенные соответственно по моделям IGRF и WDMAM.

Высокоширотная обсерватория, соответствующая стандартам ИНТЕРМАГНЕТ, будет развернута в пос. Сабетта, Ямал, и предназначена для проведения непрерывных измерений геомагнитного поля и сопровождения телеметрических навигационных систем MWD при строительстве скважин. Специалисты ГЦ РАН, который курирует создание и расширение российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ, по заказу компании Шлюмберже успешно провели в Сабетте геодезические работы координатного обеспечения геомагнитных наблюдений. Была выполнена магнитная съемка на месте расположения будущей обсерватории. Были построены карты аномальной составляющей полного вектора магнитного поля и его вертикального градиента, Серии магниторазведочных работ были выполнены на участках площадью 500x500, 100x100 и 24x24 м. Карта локальных магнитных аномалий представлена на Рис. 6. По данным съемки на финальном участке горизонтальный градиент поля в среднем имеет значения около 0,5 нТл/м. Распределение вертикального градиента представлено значениями от $-0,5$ до $+1,1$ нТл/м.

Введение в строй обсерватории Сабетта предполагалось осуществить в 2014 г. Однако установка регистрирующей аппаратуры отложена в связи с задержкой административного решения территориальных вопросов и вопросов энергообеспечения обсерватории.

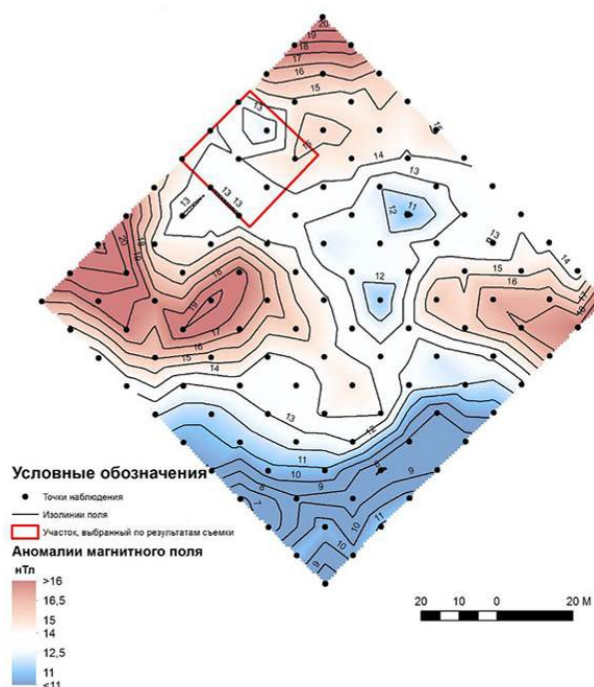


Рис. 6. Схема распределения аномалий полной напряженности магнитного поля на участке съемки 100х100 м.

4.2 Вековой ход внутреннего магнитного поля в арктическом регионе по модели и данным измерений

Модели внутреннего поля, из-за разновременности наблюдений, наличия широкого спектра высокоинтенсивных аномалий, вызванных намагниченными источниками в верхней части земной коры, а также и из-за недоучета вековой вариации содержат значительные погрешности. Для построения скорректированных локальных магнитных карт в первую очередь необходимо иметь оценки отклонений реально наблюдаемой вековой вариации от статистической модели и изменение этих отклонений во времени.

Для нескольких высокоширотных станций, расположенных в российской Арктике несколько восточнее п-ова Ямал рассчитан вековой ход общей интенсивности геомагнитного поля F по модели IGRF и по данным периодических наблюдений абсолютных величин (базисной линии). На Рис. 7 показан вековой ход на станции Диксон (DIK, 71.1°N, 129°E) и мыс Челюскин (CCS, 77.72°N, 104.28°E) за период с 1940 по 2006 г. Наблюдаемое поле на несколько десятых процента слабее, чем модельное. Разность между ними постепенно увеличивалась и в современную эпоху достигает 300 нТл. За полвека интенсивность поля увеличилась, в среднем, на 2%. Межгодовая изменчивость F по данным измерений и сглаженная по 5 точкам кривая имеет медленно меняющуюся гармонику с периодом 50-60 лет, а разность между модельной и измеренной межгодовой изменчивостью демонстрирует линейный тренд: отрицательный для DIK и положительный для CCS. Результат указывает на необходимость обсерваторского мониторинга абсолютных значений геомагнитного поля в возможно большем числе точек региона на сетке с шагом не менее 10° для коррекции глобальных моделей.

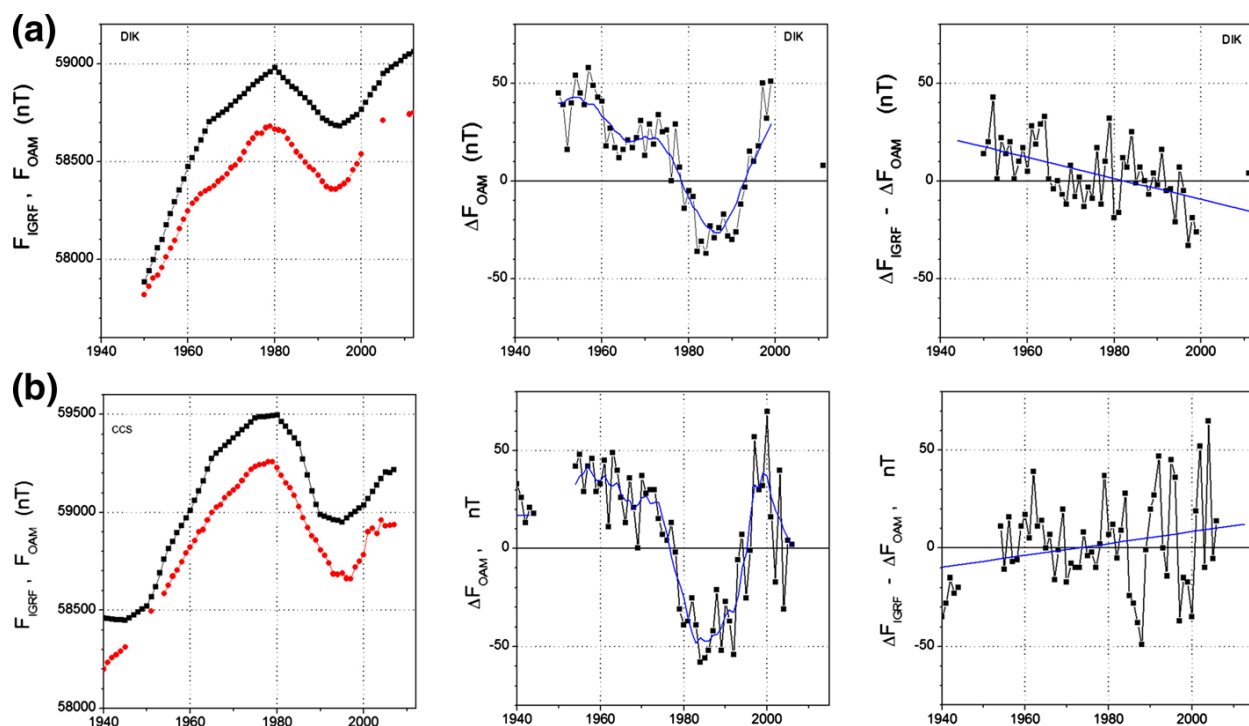


Рис. 7. Левая колонка: вековая вариация F для станций Диксон (а) и мыс Челюскин (б), рассчитанная по модели IGRF (черные точки), и по данным измерений (красные точки). Средняя колонка: межгодовая изменчивость F по данным измерений и сглаженная по 5 точкам кривая (синяя линия). Правая колонка: разность между модельной и измеренной межгодовой изменчивостью и линейный тренд.

4.3 Статистические характеристики геомагнитной возмущенности

Разработаны и протестированы алгоритмы для оценки локальной возмущенности внешнего геомагнитного поля, основанные на методах дискретного математического анализа, описывающих меру вертикальной аномальности на магнитограммах геомагнитных вариаций. Для высокоширотных станций проведено сопоставление мер аномальности с традиционными 3-часовыми традиционными геомагнитными индексами K , которые рассчитываются ретроспективно. Получен коэффициент корреляции >0.9 , что позволяет перейти к расчету нового индекса активности, основанном на мере аномальности геомагнитного поля – меры аномальности с высоким (вплоть до минутного) временным разрешением и режиме квазиреального времени.

Для оценки частоты возникновения условий, когда величина геомагнитных возмущений превышает допустимую погрешность точности измерений магнитометров MWD по среднесуточным значениям горизонтальных магнитных элементов I , D и модуля полного вектора поля F на арктических обсерваториях и МВС. На Рис. 8 для обс. Соданкюля (SOD, 67.3°N , 26.6°E) за два солнечных цикла с 1993 по 2013 гг. показаны гистограммы числа дней в году, когда возмущения внешнего магнитного поля, величины I , D и F , превышали заданные пороговые значения 1° (0.5°), 0.5° (0.25°) и 500 нТл (200 нТл), соответственно. Показано, что на широтах $60\text{--}70^\circ\text{N}$ дни значительных возмущений могут занимать более трети года, особенно в период солнечного максимума.

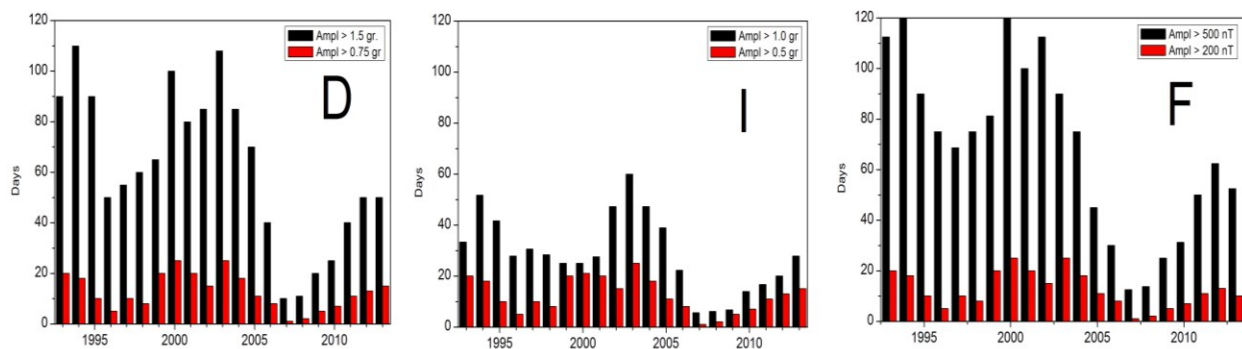


Рис. 8. Гистограммы, показывающие число дней в году, когда амплитуда среднесуточных отклонений магнитных элементов D , I и интенсивности F от спокойного уровня превышала заданные пороговые значения (обс. SOD, 1993-2013 гг.).

4.4 Организация измерений на новой арктической обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, канала связи, передачи и сбора а данных измерений в ГЦ РАН

Разработана методическая база и проведены работы по установке аппаратного магнитометрического комплекса стандарта ИНТЕРМАГНЕТ на геофизической обсерватории "Мыс Шмидта" ИКИР ДВО РАН. Вариации магнитного поля регистрируются с помощью: (1) феррозондового компонентного вариометра MAGDAS COLD (Рис. 9а). Магнитометр регистрирует вариации dH , dD , dZ с частотой 1 Гц, синхронизация к точному времени выполняется с помощью встроенного GPS-приемника; (2) $dIdD$ -магнитометра GSM-19FD GEM Systems, Канада, (Рис. 9б,в), Магнитометр представляет собой оверхаузеровский датчик GSM-19, расположенный в системе двойных колец. Периодичность измерений 2.5 с. Регистрируются вариации dD и dI и модуль полного вектора F . Синхронизация со шкалой UTC выполняется с помощью встроенного GPS-приемника.

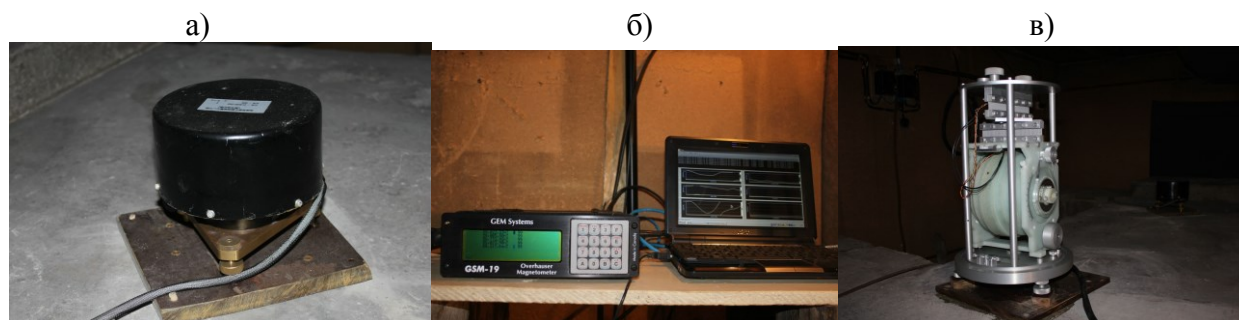


Рис. 9. Датчик MAGDAS (а), консоль (б) и сенсор магнитометра GSM-19FD (в)

Были установлены магнитометры для абсолютных измерений: I -магнитометр (Diflux, DIF) Mag-01H (Bartington Instr., Великобритания) на базе немагнитного теодолита Wild-T1 (Швейцария) для определения магнитного склонения D и наклона I с погрешностью 0.1' и протонный магнитометр ММП-203-М2 для абсолютных измерений модуля вектора магнитной индукции F , точность 0.1 нТл, оверхаузеровский магнитометр POS-1 для измерений F , чувствительность 0.01 нТл, точность 0.5 нТл, измерения с периодичностью до 1 с. Все магнитометры расположены в одном магнитном павильоне,

который имеет систему обогрева. К концу 2014 г. обсерватория практически полностью укомплектована оборудованием, необходимым для перехода на измерения в соответствии со стандартами ИНТЕРМАГНЕТ.

Основу для методического обеспечения магнитных измерений составляют требования ИНТЕРМАГНЕТ. Были разработаны алгоритмы и программы для обработки выполняемых в настоящее время вариационных измерений в виде набора скриптов для математического пакета MATLAB, которые обеспечивают: чтение исходных файлов с результатами измерений dIdD GSM-19FD (текстовый формат) и MAGDAS (бинарный формат); визуализацию исходных данных, контроль сбоев таймера; выделение и отбраковку помех в исходных данных; вывод исходных данных в формате MATLAB и текстовом; вычисление среднeminутных значений dF , dD , dI , dZ , вывод в суточные файлы в стандартах IMFv1.23 и IAGA2002; вывод графических файлов и расчет K -индексов геомагнитной активности; сравнение данных dI , dD и MAGDAS.

Минутные данные в формате IMF по электронной почте раз в сутки передаются в ГЦ РАН, для пополнения базы данных (БД) и представления на сайте Российско-украинского центра геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru/>). Поступившие данные извлекаются из электронных писем и сохраняются на отдельном ftp-сервере, который предназначен для хранения данных в виде файлов в исходном формате. Параллельно поступающие данные преобразуются в БД, управляемую СУБД MySQL. База хранится на отдельном сервере. На нем же установлены модули, выполняющие контроль качества поступающих магнитограмм. Результаты работы этих модулей также сохраняются в БД. Для пользователей организован интерактивный доступ к данным через набор веб-сервисов. Кроме того, данные визуализируются на видео-стенде. Автоматическое обновление БД происходит по мере поступления новых данных, что обеспечивает скрипт, вызываемый автоматически с заданным интервалом времени для синхронизации содержимого БД с содержимым файлового хранилища данных в исходном формате.

Тестовые непрерывные измерения проводились в течение нескольких месяцев. На Рис. 10 в качестве примера представлены магнитограммы элементов dH , dD , dZ .

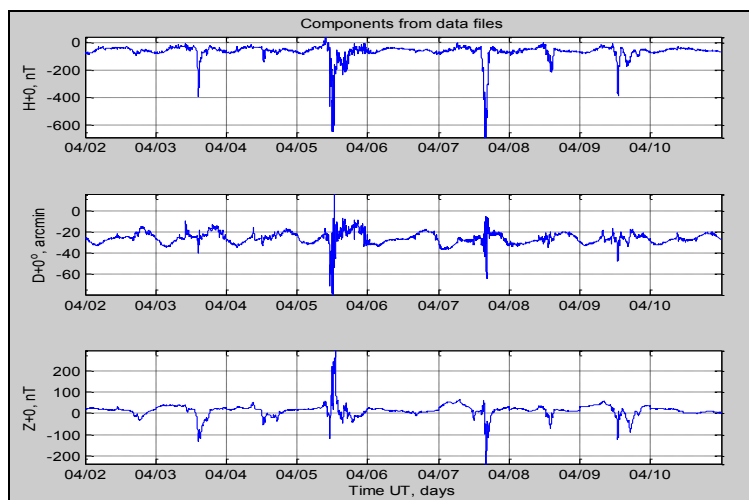


Рис. 10. Минутные данные о вариациях элементов магнитного поля dH , dD , dZ на обс. "Мыс Шмидта" за 2-10 апреля 2014 г. (минутные значения).

5. Заключение

В ходе выполнения работ по проекту получены результаты как прикладного, так и теоретического характера, а именно:

- Для развития российского сегмента геомагнитных обсерваторий и его расширения в арктическую зону разработана методическая база и проведены работы по установке аппаратного магнитометрического комплекса стандарта INTERMAGNET на наиболее высокоширотной на сегодняшний день магнитной обсерватории "Мыс Шмидта" (69°с.ш., 179.5°в.д.). Проведены тестовые непрерывные (в течение нескольких месяцев) измерения полного вектора и вариаций геомагнитного поля с организацией канала связи и передачи данных из обсерватории с дискретностью раз в сутки в центр сбора, расположенный в ГЦ РАН, для пополнения базы данных и представления на сайте.
- Вековой ход модуля полного вектора геомагнитного поля F для трех российских высокоширотных станций, полученный по модели главного поля IGRF и по данным наблюдений имеет различия, достигающие 300 нТл, скорость изменения F имеет период около 50 лет и амплитуду до 100 нТл, разность между модельным и измеренным ускорением векового знакопеременна и зависит от географического положения. Результат показывает необходимость обсерваторского мониторинга абсолютных значений геомагнитного поля в возможно большем числе точек и локальной коррекции IGRF.
- Аналог локального индекса геомагнитной активности K , рассчитанный как дискретная мера вертикальной аномальности на магнитограммах имеет коэффициент корреляции с традиционным 3-часовым K -индексом, превышающий 0.9 для всех месяцев года, что позволяет перейти к расчету индекса с высоким (до 1-мин) временным разрешением.
- Оценки частоты возмущений внешнего магнитного поля, при которых величины геомагнитных элементов превышали заданные пороговые значения, показывают, что дни значительных возмущений могут занимать более трети года в период солнечного максимума и на спаде цикла.
- По итогам проектных исследований подготовлена научная статья в журнале «Физика Земли»: Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент, 2015, №2 и статья в информационно-аналитическом журнале «Арктический Вестник/Arctic Herald»: Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения скважин в Арктическом регионе, №4, 2014.

Список литературы

1. Б.М. Яновский. Л.: ЛГУ. 1978. 592.
2. С.С. Finlay et al. *Geophys. J. Int.*, 2010, **183**, 1216–1230.
3. Т.Т. Sabaka, N. Olsen, M.E. Purucker. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159**, 2, 521–547.
4. J. Korhonen et al. *Commission for the Geol. Map of the World*, Paris, 2007.
5. А.Д. Гвишиани, Е.А. Жалковский, А.Е. Березко, и др. *Геодезия картогр.*, 2010, **4**, 33–38.
6. А.А. Соловьев, А.В. Хохлов, Е.А. Жалковский и др. / Под ред. А. Д. Гвишиани, А.В. Фролова, В.Б. Лапшина, 2012, *Публ. ГЦ РАН*, М., 364.
7. R. Lukianova, K. Mursula, A. Kozlovsky. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, **39**, L04101.
8. A. Gvishiani, R. Lukianova, A. Soloviev, A. Khokhlov. *Surveys Geophys*, 2014, **35**, 5, 1123–1154.
9. А.Д. Гвишиани, Р.Ю. Лукьянова *Физика Земли*, 2015, **2**, (в печ.).