Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье

А. Д. Гвишиани[1,2], А. А. Соловьёв[1,2], Р. В. Сидоров[1], Р. И. Краснопёров[1], А. А. Груднев[1,2], Д. В. Кудин[1,3], Дж. К. Карапетян[4] и А. О. Симонян[4]

Получено 24 августа 2018 г.; принято 15 сентября 2018 г.; опубликовано 15 декабря 2018 г.

Многочисленные задачи фундаментального и прикладного характера в области наук о Земле и солнечно-земных связей требуют постоянного роста геофизических наблюдений. При этом значительную важность имеют не только расширение сетей наблюдений и повышение их плотности, но и совершенствование геофизической аппаратуры: повышение точности приборов, увеличение частоты дискретизации регистрируемых данных, передача данных во времени, близком к реальному. Темп роста объёмов геофизической информации закономерно требует всё более эффективных методов её обработки и анализа. В данной обзорной статье представлены последние достижения в деятельности Геофизического центра РАН, направленной на развёртывание сетей наземных обсерваторских геомагнитных наблюдений в России, а также сбора и обработки данных геомагнитного мониторинга. Приведено описание инновационного аналитического аппаратно-программного комплекса МАГНУС (Мониторинг и Анализ Геомагнитных аНомалий в Унифицированной Среде), который предназначен для эффективного сбора, хранения, обработки и интеллектуального анализа геомагнитных данных. Также в статье дан обзор развития российской сети геомагнитных наблюдений и новых магнитных обсерваторий и описание различных мероприятий, направленных на повышение надёжности получения магнитных измерений, их хранения и обработки.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитное поле Земли; магнитные обсерватории; геомагнитная активность; система мониторинга.

Ссылка: Гвишиани, А. Д., А. А. Соловьёв, Р. В. Сидоров, Р. И. Краснопёров, А. А. Груднев, Д. В. Кудин, Дж. К. Карапетян и А. О. Симонян (2018), Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье, *Вестник ОНЗ РАН, 10,* NZ4001, doi:10.2205/2018NZ000357.

Введение

Российские геомагнитные обсерватории [*Gvishiani et al.,* 2014] и низкоорбитальные спутники миссии Swarm Европейского космического агентства (ESA) [*Friis-Christensen et al.,* 2006; *Olsen et al.,* 2013], оборудованные высокоточными магнитометрами, обеспечивают постоянно растущий объем данных, формирующий основу для комплексного мониторинга внутреннего и внешнего магнитных полей Земли. Более глубокое понимание лежащих

[1]Геофизический центр РАН, Москва, Россия
[2]Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[3]Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия
[4]Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА, Гюмри, Республика Армения

© 2018 Геофизический центр РАН.
http://onznews.wdcb.ru/doi/2018NZ000357-res.html

в основе этого физических процессов крайне важно как для фундаментальных, так и прикладных исследований. Например, процессы, вызванные солнечно-земными взаимодействиями, существенно влияют на функционирование современной электроэнергетической инфраструктуры. С другой стороны, непрерывный рост сетей наблюдения и объёмов информации об электромагнитной среде Земли [*Reda et al.,* 2011] требуют адекватных методов их обработки и анализа. Такое требование становится одним из наиболее важных и широко обсуждаемых вопросов в среде экспертов в области наук о данных и междисциплинарного взаимодействия (напр., [*Берёзко и др.,* 2008; *Roberts,* 2016; *Science International,* 2015]).

Магнитные обсерватории, поддерживаемые и развиваемые Геофизическим центром РАН (ГЦ РАН), оборудованы магнитометрической аппаратурой, отвечающей стандартам сети ИНТЕРМАГНЕТ (www.intermagnet.org). Регистрируемые данные непрерывно анализируются в автоматизированном режиме, что позволяет существенно упростить их очистку от техногенных помех. Тем не менее, несмотря на повсеместный рост объёмов регистрируемых данных геомагнитного мониторинга, огромные территории по-прежнему характеризуются недостаточным, либо вовсе отсутствующим покрытием стационарными пунктами геомагнитного мониторинга. Особенно остро данная проблема стоит для высокоширотных регионов Российской Федерации, где недостаточно магнитных обсерваторий, соответствующих международному стандарту [*Gvishiani et al.,* 2014]. Следует отметить, что магнитные данные, зарегистрированные в высоких (авроральных и субавроральных) широтах, являются наиболее интересными с точки зрения изучения космической погоды. Наконец, ценность высокоширотных магнитных обсерваторий связана с применением их данных для сопровождения наклонно-направленного бурения при разведке и разработке углеводородных месторождений. Таким образом, задача развёртывания достаточно плотной сети высокоточного геомагнитного мониторинга становится все более широко востребованной и будет оставаться актуальной еще долгие годы.

Аппаратно-программный комплекс (АПК) МАГНУС (Мониторинг и Анализ Геомагнитных аНомалий в Унифицированной Среде) является ядром российской сети магнитных обсерваторий и обеспечивает скоординированную обработку наземных и спутниковых магнитных измерений [*Gvishiani et al.,* 2016]. Он автоматизирует и ускоряет рутинные процедуры получения окончательных данных из предварительных магнитограмм, полученных российскими обсерваториями, благодаря реализованным алгоритмам, включающим элементы искусственного интеллекта. МАГНУС – это первая система, которая обеспечивает автоматизированное распознавание и многокритериальную классификацию экстремальных геомагнитных явлений. Система предоставляет интерактивный доступ к цифровым геомагнитным данным, результатам их обработки и модельных расчетов, а также обеспечивает их визуализацию на традиционных и сферических экранах. Приложения методов системного анализа и интеллектуального анализа данных в области геомагнитных исследований позволяют формализованное многокритериальное распознавание экстремальных магнитных явлений различной природы. Комплексный и своевременный анализ обсерваторских и спутниковых данных позволяет моделировать структуры внутреннего и внешнего магнитного поля Земли с малой задержкой по времени. Скоординированное хранение наземных и спутниковых наблюдений упрощает доступ к ним для мирового научного сообщества. МАГНУС включает в себя программные модули для автоматизированной фильтрации обсерваторских данных от техногенных помех и валидации данных в соответствии с самыми высокими стандартами ИНТЕРМАГНЕТ. Последнее делает возможным получение квазиокончательных и последующих окончательных данных с минимальной задержкой.

Итоги развёртывания магнитных обсерваторий российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ

С 2011 г. по настоящее время достигнут значительный прогресс в области развития наземных геомагнитных наблюдений в России. Одну из ключевых ролей в этой деятельности играет Геофизический центр РАН. При непосред-

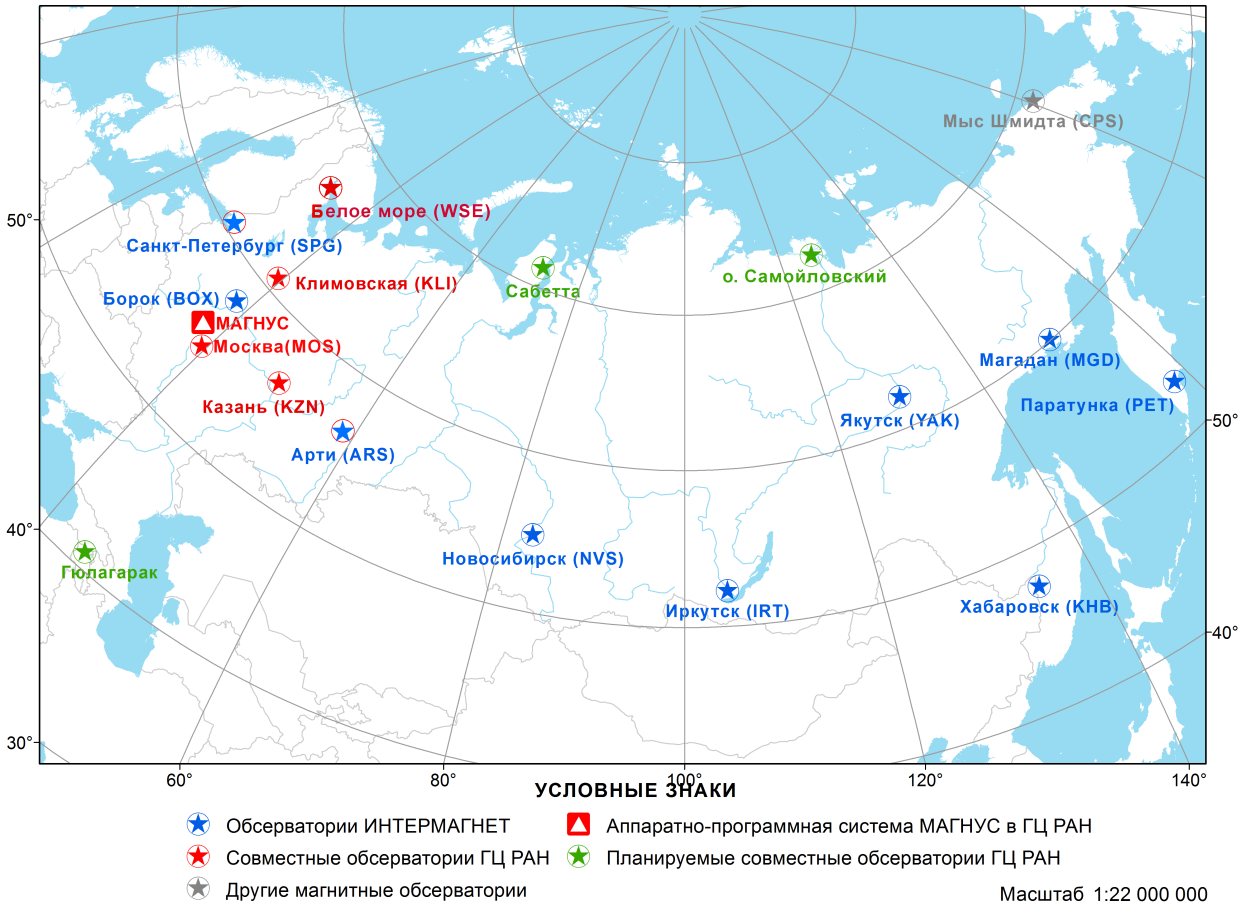
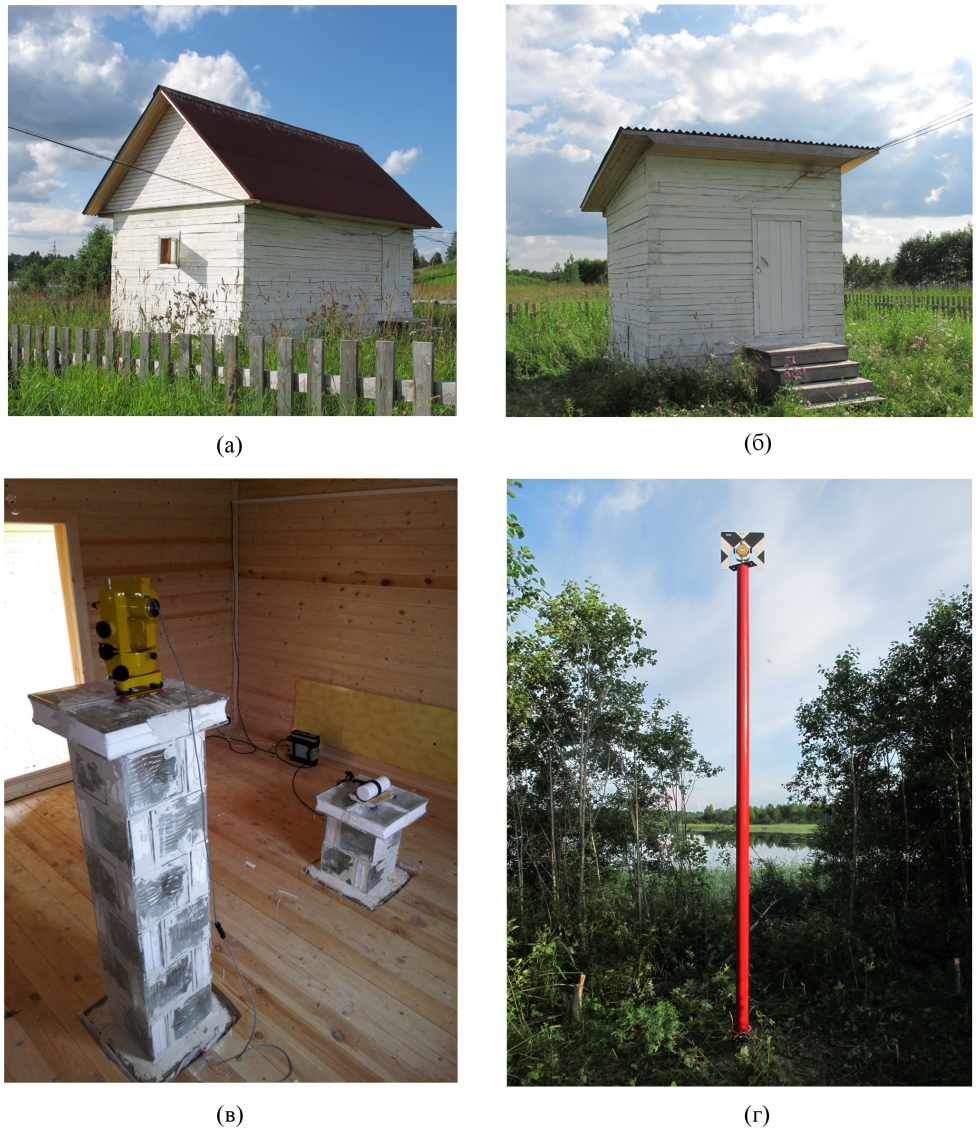


Рис. 1. Карта сети геомагнитных обсерваторий в России. 14 обсерваторий, передающих данные в АПК МАГНУС: синие звезды – обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ, красные и обведенные красным звезды – совместные обсерватории ГЦ РАН, серые звезды – другие магнитные обсерватории. Обсерватория “Москва” эксплуатируется как опытная для образовательных и исследовательских целей. Места установки новых магнитных обсерваторий отмечены зелёными звёздами.

ственном участии ГЦ РАН несколько существующих геомагнитных обсерваторий были модернизированы для соответствия стандартам ИНТЕРМАГНЕТ – “Арти” (IAGA-код ARS, Свердловская обл.), “Санкт-Петербург” (SPG, Ленинградская обл.) [*ESDB,* 2016; *Sidorov et al.,* 2017], “Бор / Подкаменная Тунгуска” (POD, Красноярский край). Также была развернута новая обсерватория “Климовская” (KLI, Архангельская обл.) [*ESDB,* 2015; *Krasnoperov et al.,* 2015; *Soloviev et al.,* 2016]. В апреле 2016 года обсерватории “Санкт-Петербург” был официально присвоен статус обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ [*Sidorov et al.,* 2017]. Карта российской сети геомагнитных обсерваторий приведена на Рис. 1. Помимо обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ на карте приведены обсерватории, поддерживаемые ГЦ РАН совместно с другими научными учреждениями и находящиеся в стадии развития в направлении указанных стандартов.

Развертывание обсерватории “Климовская” было начато в 2011 г. В качестве места расположения будущей обсерватории был выбран геобиостационар (ГБС) “Ротковец” Института физиологии природных адаптаций (ИФПА) Уральского отделения РАН вблизи деревни Климовская в Коношском районе на юге Архангельской области. По итогам работ на обсерватории “Климовская” в 2012 г. была проведена двухэтапная детальная магнитоградиентометрическая съемка, в 2013 г. построены немагнитные павильоны, проложены линии коммуни-



(а) (б)

(в) (г)

Рис. 2. Магнитная обсерватория "Климовская": абсолютный (а) и вариационный (б) измерительные павильоны, постаменты в абсолютном павильоне (в) и визирная цель для абсолютных наблюдений (г).

каций, в 2014 г. установлен полный комплект измерительного оборудования стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, оборудована система термостабилизации вариометра, установлена визирная цель и определен ее азимут, обеспечены регулярные абсолютные измерения составляющих магнитного поля, налажена регулярная передача данных в Российско-украинский центр геомагнитных данных в ГЦ РАН [*Russian-Ukrainian Geomagnetic Data Center,* 2017], http://geomag.gcras.ru/. Магнитометрия на участке расположения обсерватории была проведена в двух масштабах – с разрешением 10×10 м и 1×1 м. В результате проведенных работ по выбору места размещения постаментов была выработана новая методика высокоточной привязки геомагнитных съемок [*Krasnoperov et al.,* 2015].

Постаменты в измерительных павильонах (Рис. 2а, б) магнитной обсерватории "Климовская" сконструированы из стеклоблоков (Рис. 2в) . Магнитная восприимчивость составила около нуля единиц СИ, что делает стеклоб-

локи удачным решением в строительстве постаментов магнитных обсерваторий. Визирная цель изображена на Рис. 2г.

Более подробно этапы развёртывания обсерватории "Климовская" описаны в посвященной ей публикации [*Soloviev et al.,* 2016]. Данная обсерватория, в процессе развития которой был получен опыт успешного применения целого ряда технических решений, является перспективной, и в настоящий момент готовится к подаче заявка на ее включение в сеть ИНТЕРМАГНЕТ.

Другая магнитная обсерватория, "Санкт-Петербург", была развёрнута при поддержке Санкт-Петербургского филиала ИЗМИРАН на базе магнитной станции "Красное Озеро" – подразделения магнитно-метеорологической обсерватории Воейково [*Sidorov et al.,* 2017].

Перспективы создания новых магнитных обсерваторий и расширения российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ

Как было отмечено выше, значительную актуальность имеет задача расширения сетей геомагнитного мониторинга в высокоширотных областях. Геофизический центр РАН проводит активную деятельность по исследованию мест установки новых магнитных обсерваторий, в частности, вблизи авроральной зоны северного полушария. В мае 2013 г. и сентябре 2015 г. сотрудниками ГЦ РАН были совершены экспедиции на полуостров Ямал (Ямало-Ненецкий автономный округ), где была произведена магнитная съёмка под строительство новой обсерватории. Во время обеих экспедиций были выбраны подходящие места, свободные от магнитных аномалий как техногенного, так и природного характера. В настоящее время ожидается решение вопросов, связанных с возведением магнитной обсерватории на выбранном месте. Выбор мест расположения обсерваторских павильонов полностью соответствовал требованиям Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии (IAGA) [*Jankowski and Sucksdorff,* 1996]. На Рис. 3а приведен пример выполнения детальной магнитной съемки по пикетам, вынесенным в натуру с помощью тахеометра (Рис. 3б). Стоит отметить, что обработка полученных магнитометрами данных может оперативно выполняться непосредственно после съёмки (Рис. 3в) благодаря наличию программного обеспечения, включающего в себя авторские разработки ГЦ РАН, что позволяет получать предварительный результат непосредственно в поле и существенно ускорять процесс поиска подходящей локации.

13–17 марта 2018 г. состоялась экспедиция ГЦ РАН на Беломорскую биологическую станцию (ББС) им. Н. А. Перцова Биологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (Республика Карелия). Целью работ являлся выбор участка, пригодного для возведения павильонов будущей магнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Основными требованиями, определявшими выбор участков для будущей обсерватории, являлись, с одной стороны, достаточная удалённость от антропогенных источников помех (технических сооружений, коммуникаций, путей сообщения и пр.) и возможных магнитных аномалий природного происхождения, а с другой – доступность локации и возможность обеспечения электроснабжения и передачи данных. Таким образом, участок для строительства будущей обсерватории должен располагаться на удалении от зданий и сооружений ББС, но вместе с тем обеспечивать пеший доступ с целью контроля состояния приборов и проведения ручных измерений абсолютных величин магнитного поля Земли. По результатам магнитной съёмки была выбрана локация с практически нулевым вертикальным и горизонтальным градиентом магнитного поля Земли, отмеченная на местности (Рис. 3г). Павильон для обсерваторского магнитометра был построен из немагнитных материалов. Некоторые стройматериалы сооружения, уже имеющиеся на ББС (например, ПНД-трубы), до строительства были проверены полевым каппаметром отечественного производства ПИМВ. Их магнитная восприимчивость оказалась практически нулевой, что говорит о полном отсутствии каких-либо ферромагнитных элементов. Трубы ПНД, заполненные цементным раствором, применены для изготовления опалубки опор павильона. Постамент для размещения обсерваторского магнитометра собран из стеклоблоков, соединенных специальным клеем. Данное строительное решение уже

Рис. 3. Рабочие моменты определения мест установки новых магнитных обсерваторий: магнитометрическая съёмка в окрестностях пос. Сабетта, п-ов Ямал, Ямало-Ненецкий автономный округ (а), геодезические работы, сопровождающие магнитную съёмку, на о. Сахалин (б), оперативная полевая обработка данных магнитометрической съёмки в окрестностях пос. Сабетта, п-ов Ямал, Ямало-Ненецкий автономный округ (в), выбранное место установки обсерваторского павильона вблизи ББС им. Н. А. Перцова биологического факультета МГУ, Кандалакшский район, респ. Карелия (г), абсолютные наблюдения на территории геофизического полигона ИГИС НАН РА, окрестности деревни Гюлагарак, область Лори, Республика Армения (д).

применялось ГЦ РАН для строительства постаментов обсерваторских павильонов магнитной обсерватории “Климовская” (Коношский район Архангельской обл.).

Важное значение имеет также уплотнение существующей сети субэкваториальных магнитных обсерваторий. В связи с этим было принято решение о развертывании на территории Армении, на базе геофизического полигона Института геофизики инженерной сейсмологии им. ак. А. Назарова Национальной академии наук Республики Армения (ИГИС НАН РА), полномасштабной магнитной обсерватории высшего международного стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. С 9 по 15 апреля 2017 г. состоялась экспедиция сотрудников ГЦ РАН на геофизический полигон, расположенный в 3 км к югу от деревни Гюлагарак (область Лори, Республика Армения). Целью командировки было выполнение магнитных исследований на территории полигона для определения мест, пригодных для возведения абсолютного и вариационного павильонов магнитной обсерватории. В результате экспедиции была выполнена рекогносцировка территории полигона и проведена площадная магнитоградиентометрия в нескольких масштабах для многоуровневого исследования характера распределения аномалий магнитного поля и его градиента. Были локализованы участки, благоприятные для расположения павильонов обсерватории и места закладки приборных постаментов, а также предварительное место установки визирной цели (миры). Также была проведена серия абсолютных измерений магнитного склонения и наклонения (Рис. 3д). Также на территории полигона были отобраны образцы горных пород для лабораторного изучения их намагниченности и магнитной восприимчивости. Учитывая геологическое строение участка и наличие магматических пород среднего и основного состава (андезитобазальтов) с сильной магнитной восприимчивостью и наличием ферромагнитных минера-

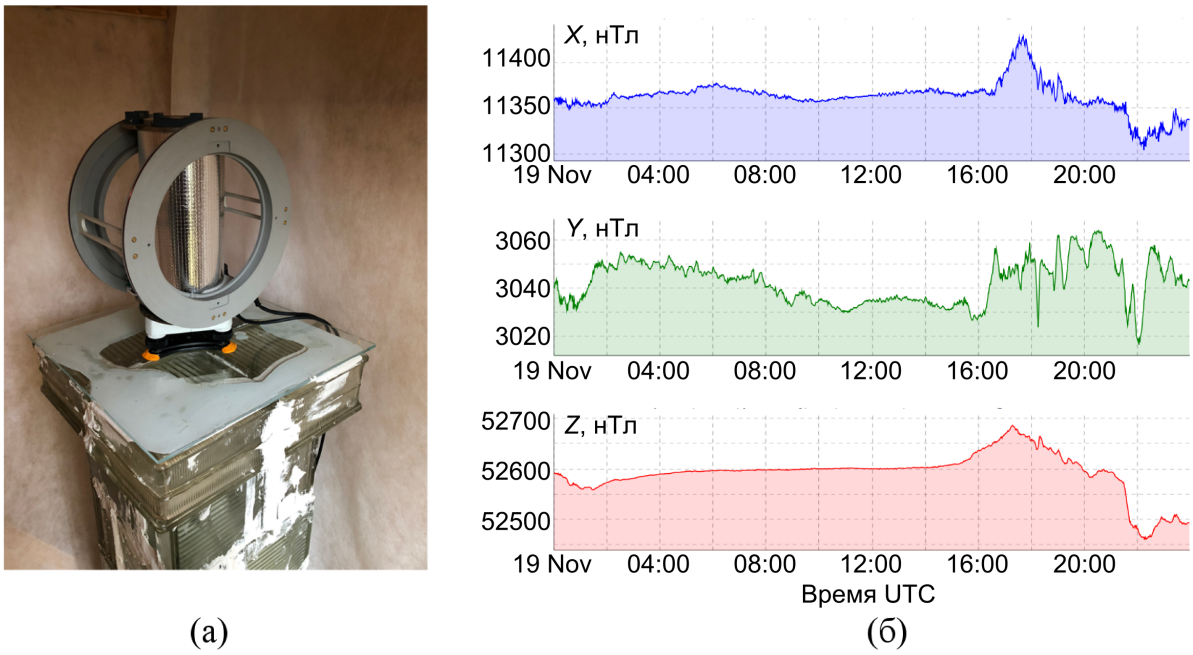


Рис. 4. Векторный протонный магнитометр POS-4 (а) и пример регистрируемых им данных по северной, восточной и вертикальной компонентам магнитного поля(б).

лов, обсерваторские павильоны будут сооружены на высоких сваях во избежание влияния природных магнитных аномалий на показания приборов. В случае успешной реализации проекта планируемая обсерватория станет единственным пунктом наблюдений магнитного поля на огромной территории, не покрытой существующей сетью, – ближайшая обсерватория расположена на расстоянии 1200 км. Создание обсерватории позволит значительно углубить геомагнитные и, в целом, геофизические научные исследования на Кавказе и внесет существенный вклад в изучение эволюции главного магнитного поля Земли.

В августе 2018 г. появилась перспектива создания ещё однойґ высокоширотной магнитной обсерватории на территории Научно-исследовательскую станцию “Остров Самойловский” (дельта р. Лены, 72° 22’ 28"с.ш., 126° 28’ 45"в.д.) Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН). По итогам магнитоградиентометрической съемки двух участков на территории острова подтверждена возможность развертывания магнитной обсерватории стандарта INTERMAGNET и локализованы места, пригодные для возведения абсолютного и вариометрического павильонов обсерватории. Места закладки приборных постаментов павильонов маркированы на местности. Приборные постаменты павильонов будут проектироваться с учетом климатических условий, таким образом, чтобы пучение и подвижки грунтов не приводили к изменению положения постаментов.

Усовершенствование парка магнитометрической аппаратуры

ГЦ РАН принял участие в испытаниях инновационного магнитометра POS4 – разработки лаборатории квантовой магнитометрии Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Данный прибор (Рис. 4а) представляет собой протонный оверхаузеровский магнитометр, оснащённый соленоидом и колечной системой, и обеспечивает одновремен-

Рис. 5. Процедура сверки обсерваторских абсолютных магнитометров. Полигон обсерватории “Арти”.

ную регистрацию значений модуля вектора магнитного поля, абсолютных значений вертикальной компоненты и вариационных значений одной из двух горизонтальных компонент (X или Y в зависимости от ориентации датчика). Испытания POS4 на магнитных обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ “Арти” (ARS, Свердловская обл.) и “Паратунка” (PET, Камчатский край) показали эффективность и устойчивость его работы на протяжении длительного времени [*Хомутов и др.,* 2016; *Narkhov et al.,* 2017]. Во второй половине 2018 года установлена магнитная обсерватория “Белое море”. Для её укомплектования магнитометер POS-4 ГЦ РАН, ранее проходивший испытания на магнитной обсерватории “Санкт-Петербург”, был перебазирован на ББС МГУ им. Н. А. Перцова и установлен в специально построенном обсерваторском павильоне (Рис. 4а). По данным серии полевых измерений абсолютных значений магнитного склонения и величины восточной компоненты вектора магнитного поля Земли магнитометр был ориентирован в географической системе координат. Сопоставление полученных данных компонент магнитного поля с расчетами по моделям IGRF и WMM последнего поколения показало, что средние значения компонент близки к модельным, что подтверждает корректную установку и функционирование POS-4. Данные, регистрируемые обсерваторией “Белое море”, могут полноценно использоваться научным сообществом. Главная ценность, которую они представляют для геофизических исследований, в том, что, во-первых, они близки по своим величинам к абсолютным значениям компонент вектора магнитного поля Земли, а во-вторых, в высокоширотном расположении этой магнитной обсерватории (на отметке 66.5 градусов северной широты, т.е. вблизи Полярного круга).

С 20 по 22 сентября 2017 г. состоялась

Первая общероссийская сверка абсолютных магнитометров, проведенная в геофизической лаборатории-обсерватории "Арти" (ARS, Свердловская обл.). Для проведения сверки скалярных абсолютных магнитометров, используемых различными институтами и университетами, был подготовлен специальный полигон. В сверке участвовало 9 магнитометров, представленных Горно-Алтайским государственным университетом (г. Горно-Алтайск), геофизической обсерваторией "Паратунка" ИКИР ДВО РАН (г. Паратунка, Камчатский край), ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), Камчатским государственным университетом им. Витуса Беринга (г. Петропавловск-Камчатский), лабораторией квантовой магнитометрии Уральского федерального университета (г. Екатеринбург), Институтом геофизики им. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург).

Процедура сверки, рекомендованная IAGA, отвечает требованиям, изложенным в *Jankowski and Sucksdorff* [1996]. Стандартная методика сверки скалярных магнитометров, рекомендованная ИНТЕРМАГНЕТ, основана на синхронных измерениях двумя скалярными магнитометрами в двух разнесенных точках с последующей перестановкой датчиков приборов (Рис. 5). При такой методике на результат практически не влияют вариации во времени (при хорошей синхронизации) и пространственная неоднородность поля в точках установки магнитометров (при точном расположении в одном и том же месте). По результатам измерений определяется как систематическая разность между магнитометрами (приборный эффект), так и пространственный градиент между пунктами установки.

По результатам работ на каждый абсолютный магнитометр были подготовлены сертификаты с приложением описания методики и протокола сверки. Также был выработан ряд методических замечаний по процедуре сверки, касающихся синхронизации приборов и отдельных технических аспектов. Результаты показали, что сверка скалярных магнитометров при правильной организации в хорошо подготовленном месте может быть эффективной и не требующей значительных затрат [*ИГФ* 2017]. Организаторами было принято решение о проведении подобного мероприятия в дальнейшем на регулярной основе.

Система МАГНУС

Основой аппаратурной и математической базы аналитического Российско-украинского центра геомагнитных данных является АПК МАГНУС. Преимущества его основываются на эффективной реализации накопленного опыта в области геофизического мониторинга и разработки математического аппарата интеллектуального анализа данных. МАГНУС базируется на единой информационной и телекоммуникационной модульной инфраструктуре, что обеспечивает передачу данных, их хранение и комплексную системную обработку. Инфраструктура системы остается открытой для установки дополнительных программных компонентов. МАГНУС предназначен для выполнения следующих задач:

1. сбор и систематизация наземных и спутниковых геомагнитных измерений;
2. автоматизированная очистка обсерваторских данных от искусственных помех и их верификация в соответствии со стандартами ИНТЕРМАГНЕТ;
3. распознавание, классификация и кодирование данных об экстремальных геомагнитных явлениях;
4. модельные расчеты;
5. обеспечение интерактивного онлайн-доступа к исходным данным, результатам их обработки, информации об экстремальных геомагнитных событиях, а также результатам моделирования;
6. визуализация.

Информационные потоки в МАГНУС, основные функции и аппаратная часть системы схематически представлены на Рис. 6.

Хранение данных. Оперативные геомагнитные данные, передаваемые обсерваториями ИНТЕРМАГНЕТ по телекоммуникационным линиям, имеют статус предварительных данных. Они представляют собой "сырые" вариационные значения компонент поля, не привязанные к изменчивым во времени базисным линиям. Они также могут содержать возмущения техногенного характера или пропуски. Вместе с тем, предварительные данные доступны для пользователей с минимальной задержкой по времени. Обсерваторским данным, прошедшим процедуру

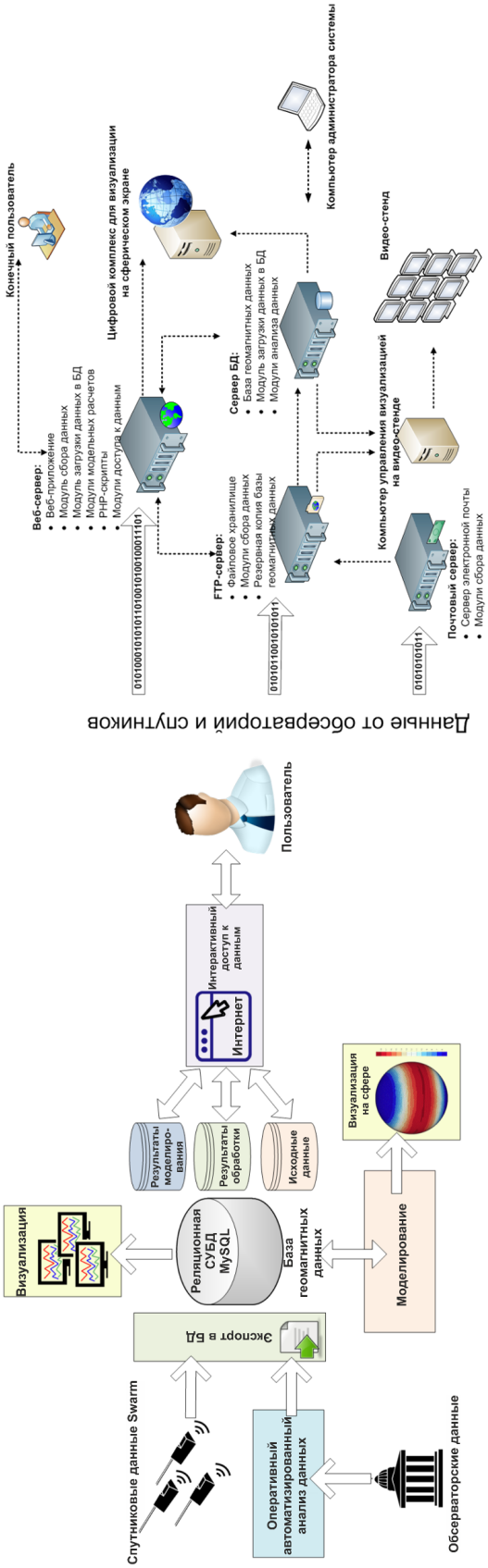


Рис. 6. Программные компоненты (а) и аппаратная часть (б) системы МАГНУС.

удаления техногенных сбоев, заполнения пропусков (где это возможно), привязки к базисным линиям и последующего пересчета абсолютных значений [*Rasson,* 2005] компонент поля, присваивается статус окончательных данных. Подготовка окончательных данных является сложной, времязатратной и трудоемкой процедурой, которая проводится в основном вручную квалифицированными магнитологами на обсерваториях или в центрах сбора геомагнитных данных. Окончательные данные каждой обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ готовятся ежегодно с запаздыванием до нескольких лет [*St-Louis et al.,* 2012]. Вместе с тем промежуточным решением являются т.н. квазиокончательные данные [*Peltier and Chulliat,* 2010]. Такие данные выпускаются с задержкой в несколько месяцев, в них по большей части устранены помехи и пропуски, и их корректировка осуществляется с помощью временных базисных линий. По нормативу расхождения между окончательными и квазиокончательными магнитограммами не должны превышать 5 нТл [*Reay et al.,* 2011]. Подготовка квазиокончательных данных обычно также выполняется вручную.

Глобальное и гораздо более равномерное покрытие поверхности Земли магнитными наблюдениями обеспечивают низкоорбитальные спутники. К сожалению, главным недостатком спутниковых наблюдений по сравнению с обсерваторскими является их непродолжительность – в среднем время жизни спутников ограничено несколькими годами. Текущей спутниковой миссией, осуществляющей геомагнитный мониторинг, является миссия Swarm. Данные Swarm, прошедшие все стадии обработки, публикуются с задержкой 3 дня [*Olsen et al.,* 2013]. Они представляют собой полные значения трех компонент магнитного поля и его полную напряженность, т.е. являются окончательными в терминах обсерваторских наблюдений.

Очевидно, вопросы оперативной подготовки окончательных обсерваторских магнитограмм и скоординированного хранения наземных и спутниковых данных геомагнитного мониторинга являются крайне актуальными. В рамках МАГНУС хранение наземных и спутниковых данных, как исходных, так и обработанных, организовано с использованием реляционной СУБД, что обеспечивает высокое быстродействие и гибкость запросов к данным. Это и другие технические решения, реализованные при разработке МАГНУС, имеют существенные преимущества по сравнению с действующими информационными узлами ИНТЕРМАГНЕТ. Например, в парижском узле все данные, поступающие более чем из 15 обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ и ряда других обсерваторий по всему миру (Bureau central de Magnetisme Terrestre, BCMT [Электронный ресурс], URL: http://www.bcmt.fr/, дата обращения 03.04.2017) хранятся в текстовом формате ASCII в виде обычных файлов, что имеет ряд очевидных недостатков (существенные ограничения на запросы данных, неэффективное использование памяти и др.). В узле г. Киото (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/, дата обращения 20.06.2016) данные хранятся как в суточных ASCII-файлах, так и в месячных бинарных файлах, которые автоматически генерируются из текстовых. Наличие бинарных файлов уменьшает занимаемый объем, однако не обеспечивает достаточную гибкость и быстродействие поисковых запросов.

Оперативные данные, регистрируемые на российских геомагнитных обсерваториях, передаются в МАГНУС в режиме квазиреального времени в виде файлов в одном из принятых форматов (INTERMAGNET 2013 IMFV1.23 INTERMAGNET GIN Dissemination Format for Minute Values, Электронный ресурс, URL: http://intermagnet.org/data-donnee/formats/imfv123-eng.php, дата обращения 20.06.2016; MinGeo Ltd., The magnetic data collection platform with Maglin, the acquisition software. URL: http://www.mingeo.com/prod-magrec4b.html, дата обращения 21.06.2016; V-DAT, IAGA Working Group IAGA-2002 exchange format. IAGA, 2011. URL: http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vdat/IAGA2002/iaga2002format.html, дата обращения 20.06.2016). В зависимости от телекоммуникационных возможностей данные передаются по электронной почте или по FTP-протоколу с определенной задержкой (от 10 минут до 2-х суток). Далее происходит их автоматический экспорт в геомагнитную БД. Разумеется, исходные файлы с данными также хранятся в системе. Пример графиков предварительных магнитограмм и вспомогательных данных

обсерватории "Климовская" (KLI), сгенерированных из геомагнитной БД по запросу пользователя, показан на Рис. 7

Традиционный формат хранения данных, регистрируемых тремя спутниками Swarm, обладает теми же недостатками, что и принятый формат для хранения обсерваторских наблюдений. Данные Swarm хранятся в виде суточных бинарных файлов в формате CDF (Common Data Format, http://cdf.gsfc.nasa.gov/). В нем хранятся многомерные массивы регистрируемых данных, этот формат широко используется в климатологии, метеорологии, океанографии и ГИС-приложениях. К сожалению, разбивка данных по суточным файлам не дает достаточной гибкости при запросах к данным и работе с ними. При публикации новых суточных файлов на сервере Европейского космического агентства (ЕКА) система МАГНУС автоматически их загружает, извлекает информацию, относящуюся к измерениям магнитного поля Земли, и экспортирует в таблицы своей геомагнитной базы, по структуре и формату схожие с таблицами для хранения обсерваторских данных. Именно это обстоятельство обеспечивает скоординированное хранение наземных и спутниковых данных, возможность их комплексирования и совместного анализа.

Верификация обсерваторских данных. Аналитический блок АПК МАГНУС основан на формализованной интеграции знаний и опыта, накопленных экспертами в области распознавания и изучения природных экстремальных событий и антропогенных возмущений на магнитограммах. Ключевой особенностью МАГНУС является автоматизация распознавания техногенных аномалий в магнитограммах по мере их поступления, а также привязка данных к базисным значениям и последующий расчет квазиокончательных данных. Наиболее распространёнными антропогенными аномалиями на геомагнитных записях являются "выбросы" и "скачки" Выбросы характерны для исходных записей геомагнитных вариаций поля, скачки – для базисных значений. Алгоритмы распознавания выбросов подробно изложены в ряде предшествующих работ авторов. В частности, ряд основополагающих алгоритмов распознавания возмущений на временных рядах описан в [*Gvishiani et al.*, 2004, 2008], а в последующих работах [*Soloviev et al.*, 2009, 2012a, 2012b] новые разработки применяются к задаче поиска выбросов на магнитограммах. Настройка алгоритмов для каждой обсерватории осуществляется путем подбора значений свободных параметров алгоритма в процессе его обучения. Результаты распознавания аномальных фрагментов записи сохраняются в геомагнитной БД. Рис. 8 демонстрирует верификацию данных в части распознавания и устранения техногенных сбоев на примере магнитной обсерватории "Климовская" (KLI). Если на обсерватории имеется резервный вариометр, удаленные фрагменты заменяются корректно зарегистрированными данными, в противном случае остаются пропуски.

Система МАГНУС также дает возможность пользователям проводить распознавание антропогенных выбросов на своих данных удаленно, при помощи специализированного веб-интерфейса (http://geomag.gcras.ru/). Данные пользователя загружаются в МАГНУС в стандартном формате IAGA-2002, результаты распознавания предоставляются в виде графика исходной магнитограммы с отмеченными распознанными выбросами. Таким образом, функционал МАГНУС не ограничен данными обсерваторий российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ; пользователю предоставляется возможность обрабатывать данные любой обсерватории по всему миру. Это открывает перед МАГНУС широкие возможности для использования в глобальных магнитных исследованиях.

После удаления сбоев происходит определение базисных значений для каждой компоненты на основе результатов абсолютных наблюдений. Далее выполняется привязка вариационных измерений к базисным значениям и пересчет квазиокончательных данных, представляющих собой приближенные значения компонент полного вектора геомагнитного поля. Запуск программы пересчета аппроксимирующей базисной кривой выполняется каждый раз, когда поступают результаты новых абсолютных наблюдений, что обеспечивает получение соответствующих квазиокончательных данных с минимальной задержкой по времени. Последовательность автоматизированного расчета квазиокончательных данных представлена на Рис. 9

Оценка геомагнитной активности. Система МАГНУС выполняет распознавание и мно-

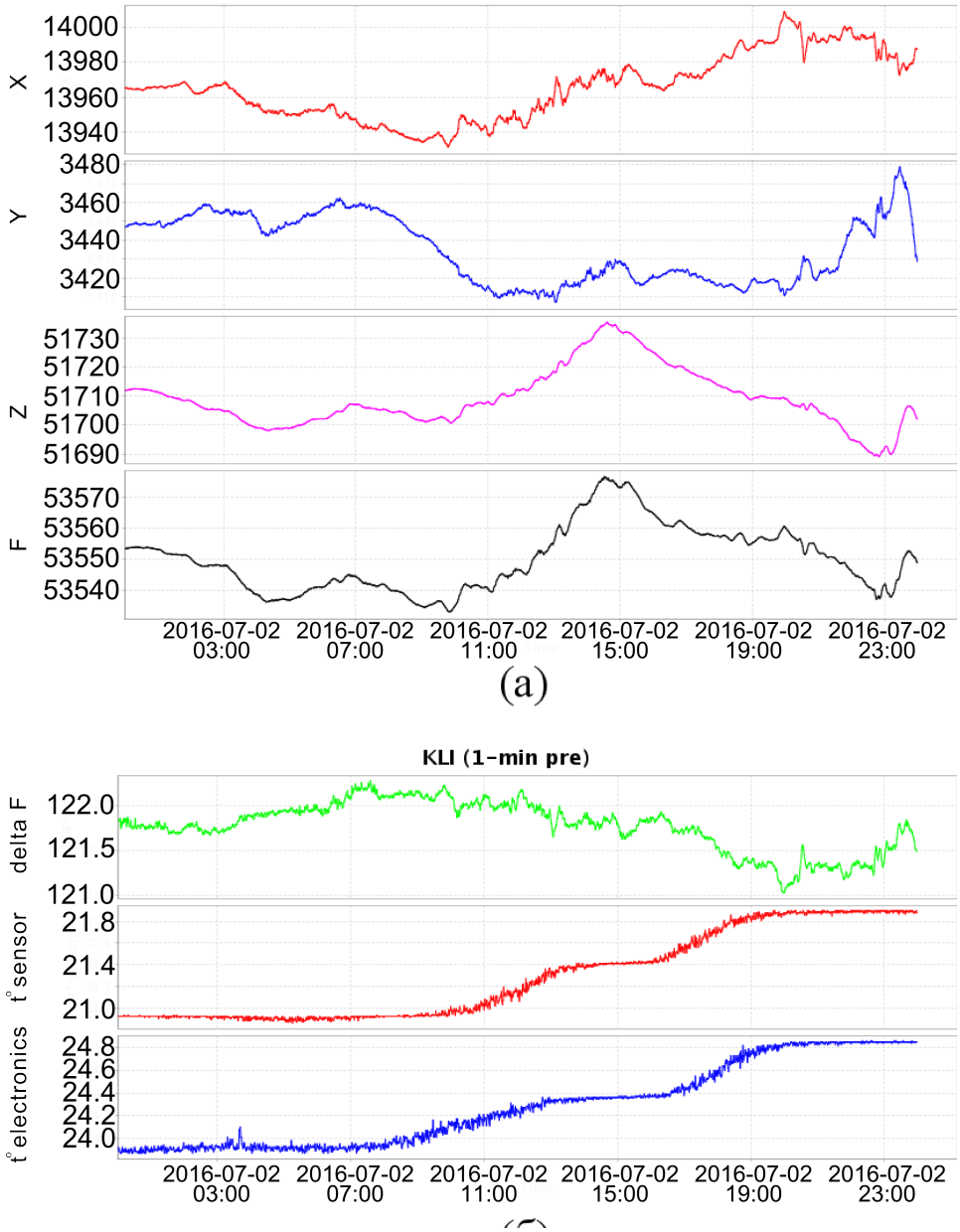


Рис. 7. Магнитограммы, полученные из обсерватории "Климовская": а) 1-минутные магнитограммы ортогональных компонент вектора магнитного поля (X, Y, Z) и его измеренный модуль (F); б) разность (δF) между измеренными и вычисленными по трем компонентам значениями модуля вектора магнитного поля; температурные вариации сенсора обсерваторского вариометра (t° sensor) и его блока электроники (t° electronics). Графики сгенерированы с помощью инструмента графического представления данных МАГНУС (http://geomag.gcras.ru/).

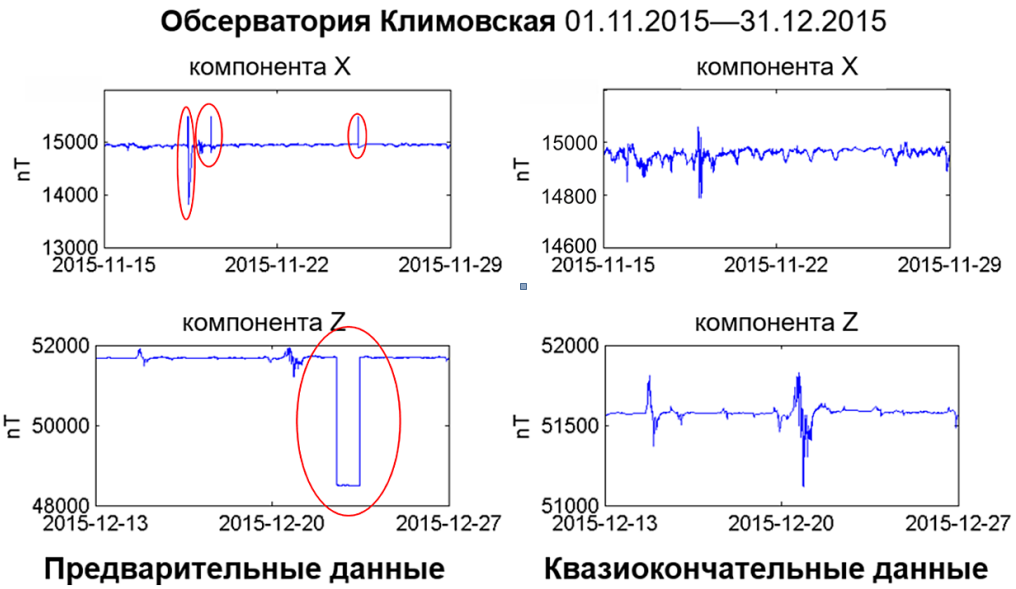


Рис. 8. Пример расчета квазиокончательных данных по мере поступления обсерваторских наблюдений (обсерватория “Климовская”). Исходные (предварительные) магнитограммы содержат выбросы (компонента X) и скачки (компонента Z).

гокритериальную оценку природной геомагнитной активности при помощи серии индикаторов, построенных на базе оригинальных алгоритмов Геофизического центра РАН и традиционных подходов. К ним относятся: МА – распознавание природных аномалий с использованием меры аномальности; dBdt – оценка природных геомагнитных возмущений на основе скорости изменения магнитного поля; Amp – оценка максимальной амплитуды геомагнитных возмущений; Kind – оперативный расчет K-индекса. Каждый из перечисленных индикаторов рассчитывается по исходным магнитограммам с набором заданных временных разрешений: 1 минута, 1 час, 3 часа, 1 сутки. Результаты распознавания и оценки геомагнитной активности классифицируются, кодируются и сохраняются в базе данных в соответствии с единой процедурой, что дает пользователям проводить многокритериальную классификацию геомагнитных возмущений. В соответствующем онлайн-интерфейсе МАГНУС (http://geomag.gcras.ru/) приведена справка по всем используемым индикаторам. Ниже приведем их краткое описание и примеры работы.

Индикатор “Мера аномальности” (МА) обеспечивает в каждый момент времени оценку геомагнитной активности в единой нормированной шкале $[-1, 1]$, где -1 соответствует фоновым значениям исходной записи и 1 соответствует наиболее экстремальным значениям. Шкала активности включает четыре класса: $[-1; 0{,}4)$ “фон”; $[0{,}4; 0{,}55)$ “слабая аномалия”; $[0{,}55; 0{,}7)$ “аномалия”; $[0{,}7; 1]$ “сильная аномалия”. Алгоритм МА основан на теории Дискретного математического анализа [*Agayan et al.*, 2016, 2018; *Gvishiani et al.*, 2014; *Soloviev et al.*, 2012a], во многом опирающегося на теорию нечетких множеств. Важным преимуществом МА является ее способность функционировать с минимальной задержкой по времени, так как временное разрешение этой меры зависит только от шага дискретизации исходной записи. Расчет МА и оценка активности выполняются каждый раз, когда новые фрагменты 1-минутных или 1-секундных магнитограмм поступают в МАГНУС.

Индикатор геомагнитной активности dBdt оценивает скорость изменения геомагнитного поля dB/dt и, следовательно, индуцированное электрическое поле $E \sim dB/dt$. dBdt рассчитывается для каждой компоненты и модуля вектора; его максимальные значения, полученные в пределах 1-минутных, 1- и 3-часовых интервалов классифицируются и хранятся в БД. Эти результаты используются для расчета экстремальных значений геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ)

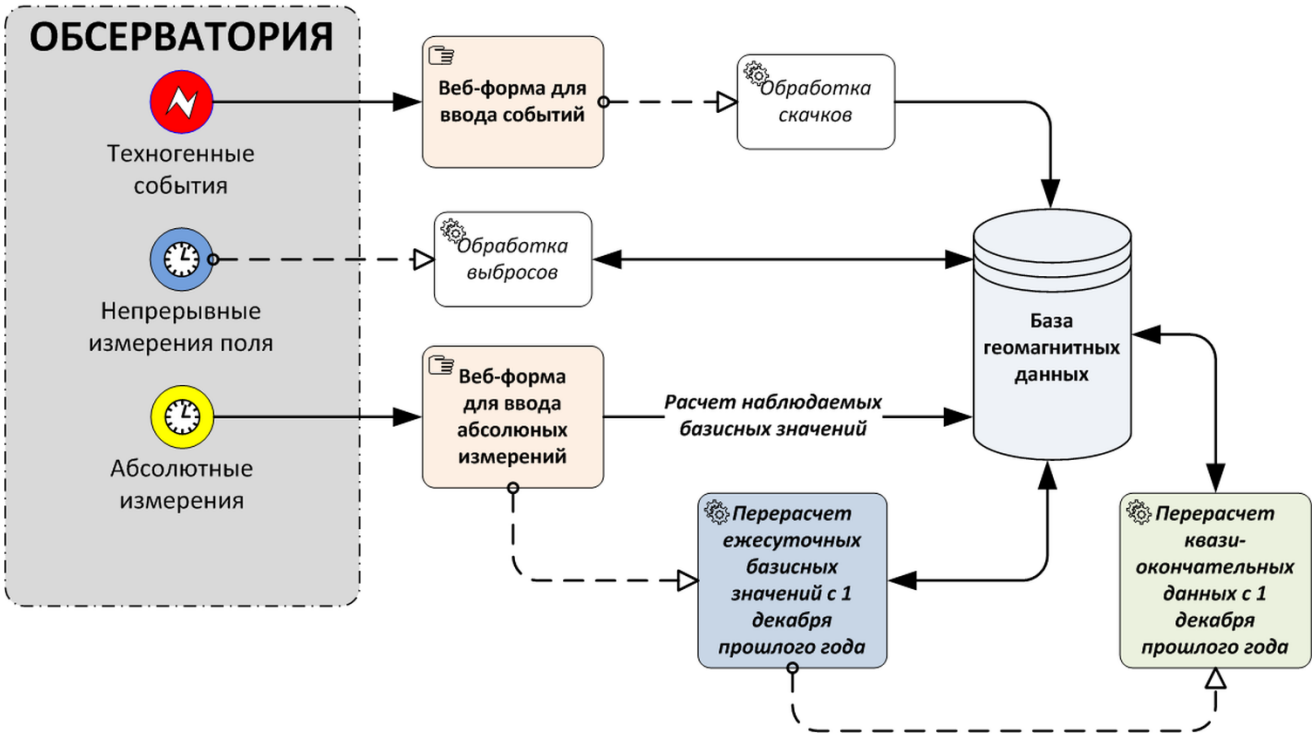


Рис. 9. Автоматизированный блок расчета квазиокончательных геомагнитных данных.

[*Barbosa et al.,* 2015] и могут применяться для оценки рисков чрезвычайных ситуаций, например, в функционировании электрических сетей.

Индикатор интенсивности геомагнитных возмущений (Amp) основан на мониторинге амплитуды вариаций поля. Он рассчитывается для всех трех компонент и модуля вектора геомагнитного поля как максимальная амплитуда возмущений в течение трех временных интервалов: 1, 3 и 24 часа. Результаты применения алгоритмов dBdt и Amp классифицируются по 10-балльной шкале (0–9), где значения ≤ 3 соответствуют “фону”, 4 – “слабой аномалии”, 5–7 – “аномалии” и 8–9 – “сильной аномалии”.

Индикатор Kind соответствует расчёту -индекса геомагнитной активности в квазиреальном времени. Классический подход к расчету K-индекса [*Bartels,* 1938; *Bartels et al.,* 1939] не вполне подходит для оперативного мониторинга геомагнитной среды из-за 3-часовой задержки. Алгоритм Kind обеспечивает вычисление K-индекса с 10-минутным шагом по времени. Результаты применения алгоритма Kind также классифицируются по 10-балльной шкале (0–9) с той же градацией, что и в предыдущем случае.

Мониторинг магнитного поля на основе представленных индикаторов рассмотрен на примере данных обсерватории “Магадан” (MGD) за период с 19 по 22 декабря 2015 г. Начало фрагмента соответствует спокойной магнитной обстановке и характеризуется близкими к 0 значениями планетарного K_p- и региональных K-индексов. Главная фаза геомагнитной бури продолжалась 20–21 декабря. Она выражена значениями K_p-индекса, достигающими 7 [*GFZ,* 2016], и значениями регионального K-индекса, приближающимися к 8. Данной геомагнитной буре, главная фаза которой началась 20 декабря, предшествовало внезапное начало за несколько часов вечером 19 декабря. Показательно, что внезапное начало было распознано как аномальное событие по индикаторам MA и Amp (Рис. 10). Возмущения в H-компоненте, связанные с бурей, также характеризуются аномальными значениями MA, Amp и Kind. Индикатор dBdt показывает, напротив, относительно небольшие значения, которые

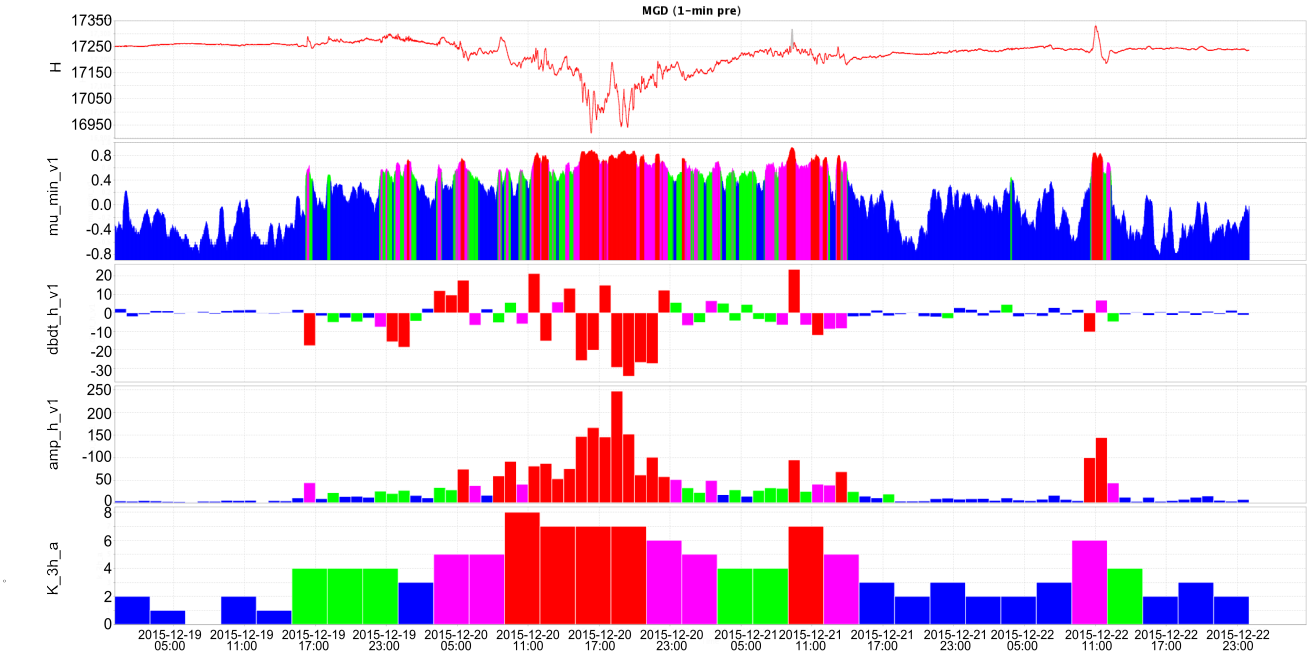


Рис. 10. Многокритериальная оценка геомагнитной активности 19–22 декабря 2015 г. по данным компоненты H обсерватории "Магадан" (MGD) (1-й график). На 2–5 графиках представлены индикаторы геомагнитной активности: amp_h_v1 – часовые максимальные амплитуды (Amp) компоненты H, mu_min_v1 – минутные значения меры аномальности (MA) компоненты H, dbdt_h_v1 – максимальные часовые значения скорости изменения (dBdt) компоненты H, k_3h_a – 3-часовой K-индекс. Цвета графиков индикаторов геомагнитной активности отражают различные состояния магнитного поля: синий – "фон", зеленый – "слабая аномалия", фиолетовый – "аномалия" и красный – "сильная аномалия". Время внезапного начала магнитной бури отмечено стрелкой на 1-м графике.

не были классифицированы системой МАГНУС как аномальные. В связи с удаленностью обсерватории "Магадан" от северного магнитного полюса для нее характерна не столь большая скорость изменения магнитного поля, как для более высокоширотных обсерваторий. Для них значения dBdt за этот период времени были гораздо больше и достигали аномальных значений до 150 нТл/мин.

Аналогичные расчеты МАГНУС обеспечивает в отношении геомагнитных данных Swarm вдоль пролетов трех спутников. На данный момент реализованы две функции: расчет меры геомагнитной активности MA по данным одного из трех спутников и расчет длины разностного вектора по данным спутников A и C, которые перемещаются на одной высоте параллельно друг другу. Все расчеты выполняются на базе 1-секундных данных, зарегистрированных за указанный пользователем промежуток времени. В результате онлайн-запроса на сервере генерируется видеоролик с анимацией выбранных параметров, меняющихся во времени и по пространству, и отправляется на электронную почту пользователя (Рис. 11).

Модельные расчеты. МАГНУС включает в себя несколько блоков, выполняющих задачи моделирования различных электромагнитных параметров на базе поступающих данных. Каждый из них имеет свой веб-интерфейс для возможности онлайн-доступа к расчетным модулям и результатам моделирования. В одном из них осуществляется моделирование возмущенной составляющей полной напряженности для территории РФ. Рассчитанные значения в точках установки обсерваторий интерполируются на

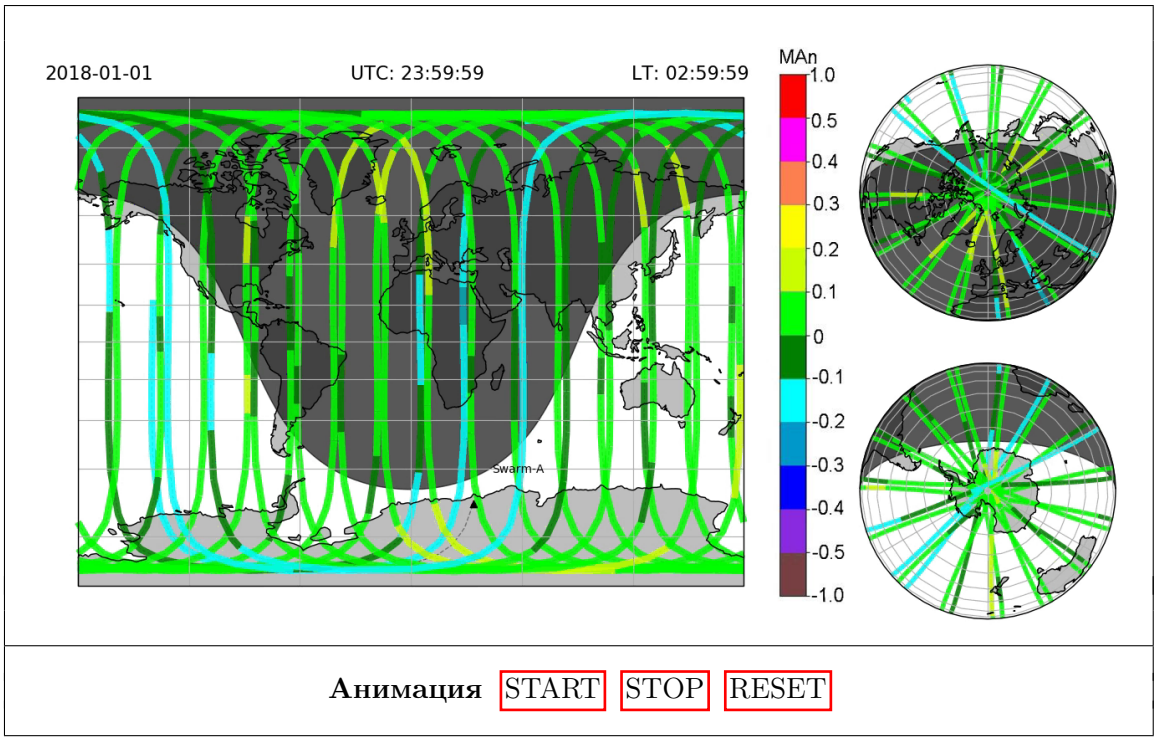


Рис. 11. Пример видеоролика демонстрирующего движение спутника Swarm A и отображение значений МА по северной компоненте вдоль его траектории в трех проекциях.

регулярную географическую сетку с использованием триангуляции Делоне, и ежечасно генерируется цифровая карта пространственного распределения расчетных отклонений.

МАГНУС также обеспечивает доступ к результатам оценки геомагнитных эффектов, вызванных крупномасштабной атмосферной динамикой, характеризующейся планетарными волновыми модами. Их распознавание выполняется с использованием эмпирического метода разложения рядов среднесуточных значений горизонтальной составляющей на спектральные компоненты. Результатом является получение амплитуд колебаний (в нТл) с оценкой их средних периодов. Для каждой обсерватории соответствующий анализ проводится систематически с 6-месячным интервалом, поскольку за это время накапливаются достаточно длинные ряды данных. Результаты сохраняются в базе данных и предоставляются пользователю по запросу через веб-интерфейс в ASCII-формате.

Еще один модельный блок обеспечивает оперативное моделирование Sq-вариации геомагнитного поля. Стандартная методика вычисления Sq-вариации использует одноминутные значения магнитного поля за 5 международных спокойных дней (Q-дней) каждого месяца. Эти дни определяются Центром геофизических исследований в Потсдаме (Германия) и публикуются с задержкой около 1 месяца. В МАГНУС реализована программа вычисления Sq с минимальной задержкой. Входными параметрами для программы являются код обсерватории, для которой нужно вычислить спокойный ход, и дата (год, месяц, день). Обновление данных Sq производится при появлении нового спокойного дня, если последний день оказался возмущённым, данные Sq остаются неизменными. Выходные данные содержат значения спокойного поля по 3 компонентам для 24 часов мирового времени выбранного дня.

Другой модельный блок МАГНУС представляет собой веб-ориентированное приложение для расчета электромагнитных параметров приполярной ионосферы [*Lukianova and Christiansen,* 2006] и визуализации результатов их моделирования. Веб-страница с поль-

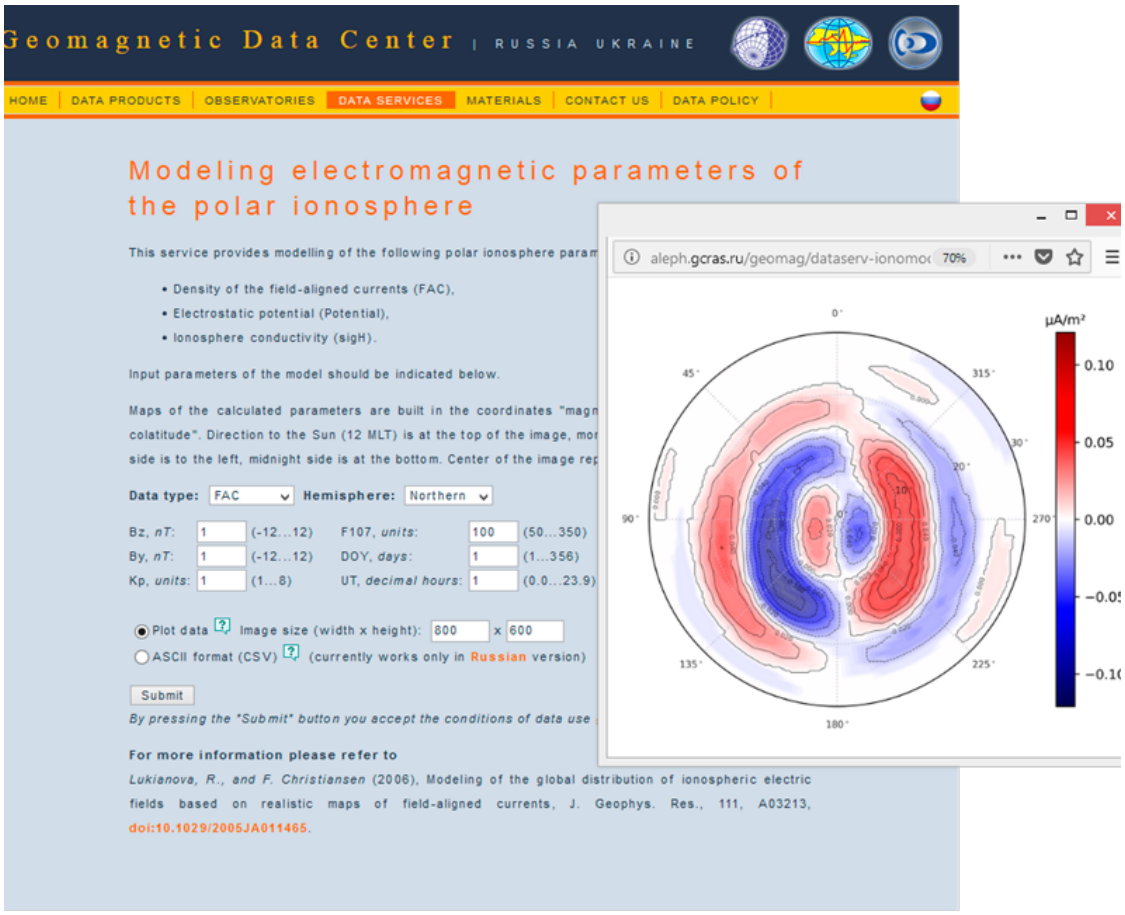
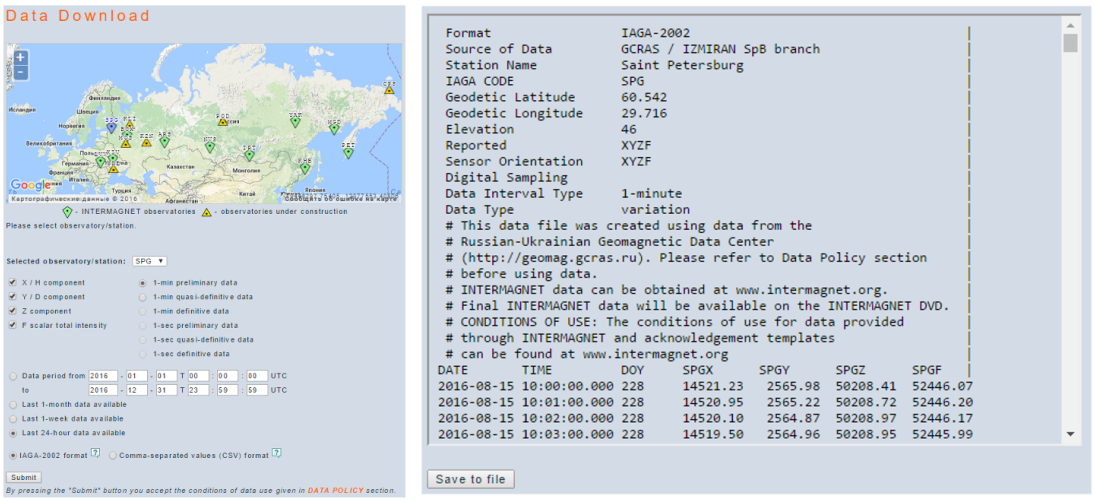


Рис. 12. Пользовательский веб-интерфейс моделирования приполярной ионосферы (http://geomag.gcras.ru/) и вывод результата моделирования плотности продольных токов в виде карты изолиний в координатах “местное магнитное время – магнитная коширота”. Север указывает направление на Солнце, восток – на утро. Центр изображения соответствует геомагнитному полюсу.

зовательским интерфейсом также доступна по адресу http://geomag.gcras.ru/. Данный сервис позволяет моделировать следующие параметры: плотность продольных токов (FAC), электростатический потенциал (potential) и проводимость ионосферы (sigH). Входные параметры модели включают в себя: полушарие, значения компонент вектора магнитного поля By и Bz, значение планетарного K_p-индекса геомагнитной активности, значение индекса солнечной активности, номер дня года и время UT. Вывод данных возможен в графическом (Рис. 12) и текстовом (ASCII) форматах.

Доступ к данным. МАГНУС предоставляет пользователям доступ как ко всем исходным данным, поступающим в систему, так и расчётам, сделанным на их основе. Интернет-доступ к данным обеспечивается Java-сервлетами с использованием HTTP-запросов, которые формируются через веб-интерфейс. Пример доступа к обсерваторским данным в виде цифрового массива приведен на Рис. 13а Для формирования соответствующего запроса пользователь выбирает обсерваторию с помощью интерактивной карты или раскрывающегося списка, указывает интересующие компоненты и/или модуль вектора геомагнитного поля $(X/H, Y/D, Z, F)$, тип запрашиваемых геомагнитных данных (1-минутные или 1-секундные предварительные, квазиокончательные или окончательные данные) и интервал времени. Выходной массив данных может быть представлен в формате IAGA-2002 (Рис. 13б) или в формате значений, разделенных



(а) (б)

Рис. 13. а) веб-интерфейс для доступа к обсерваторским данным; б) результаты запроса к БД в формате IAGA-2002. Выбрана обсерватория “Санкт-Петербург” (http://geomag.gcras.ru/).

запятыми (CSV). Результаты запроса в формате CSV содержат информацию о распознанных техногенных возмущениях.

Для расширения возможностей работы с БД в МАГНУС реализован веб-сервис для интерактивного просмотра магнитограмм и сопутствующих измерений в графическом формате. Улучшенный веб-сервис Plot 2.0 (http://geomag.gcras.ru/) реализован согласно принципу микросервисной архитектуры с использованием свободных языков программирования. Он позволяет осуществлять построение набора графиков заданного тематического набора временных рядов, включая графики измерений компонент поля, температуры датчика, базисных значений, разностных производных вектора магнитной индукции **B** и др. (Рис. 14).

В его функции также входят одновременное построение графиков с нескольких обсерваторий с пометкой распознанных системой МАГНУС техногенных возмущений, обеспечение синхронного масштабирования и слежения за данными, сохранение построенных данных, в том числе в заданном пользователем масштабе, в графические файлы формата PNG. Таким образом, улучшенный веб-сервис построения позволяет не только производить оперативный контроль качества поступающих данных, но и обнаруживать сбои в работе обсерваторских приборов в режиме, близком к реальному времени.

Доступ к цифровым массивам данных Swarm реализован на базе Java-сервлетов через специальный веб-интерфейс (Рис. 15а). Хранение Swarm-данных с использованием СУБД открывает широкие возможности для построения гибких запросов к данным и быстродействия их отработки. В системе МАГНУС доступ предполагает возможность двух вариантов пространственной выборки спутниковых данных. Первый из них заключается в выборе области заданных размеров в окрестности выбранной обсерватории, второй – в указании географических координат углов трапецеидальной области. При выборе данных пользователь указывает один из трех спутников Swarm – A, B или C [*Haagmans et al.*, 2013], а также интересующий интервал времени. Результаты сформированного запроса к БД представляются в текстовом формате (Рис. 15а).

Для доступа к магнитным данным Swarm в графическом формате в МАГНУС реализовано веб-ориентированное ГИС-приложение (http://geomag.gcras.ru/), позволяющее осуществлять онлайн-мониторинг прямых наблюдений, непрерывно передаваемых с трех спутников. Геомагнитные данные, накопленные за период 10 дней, автоматически преобразу-

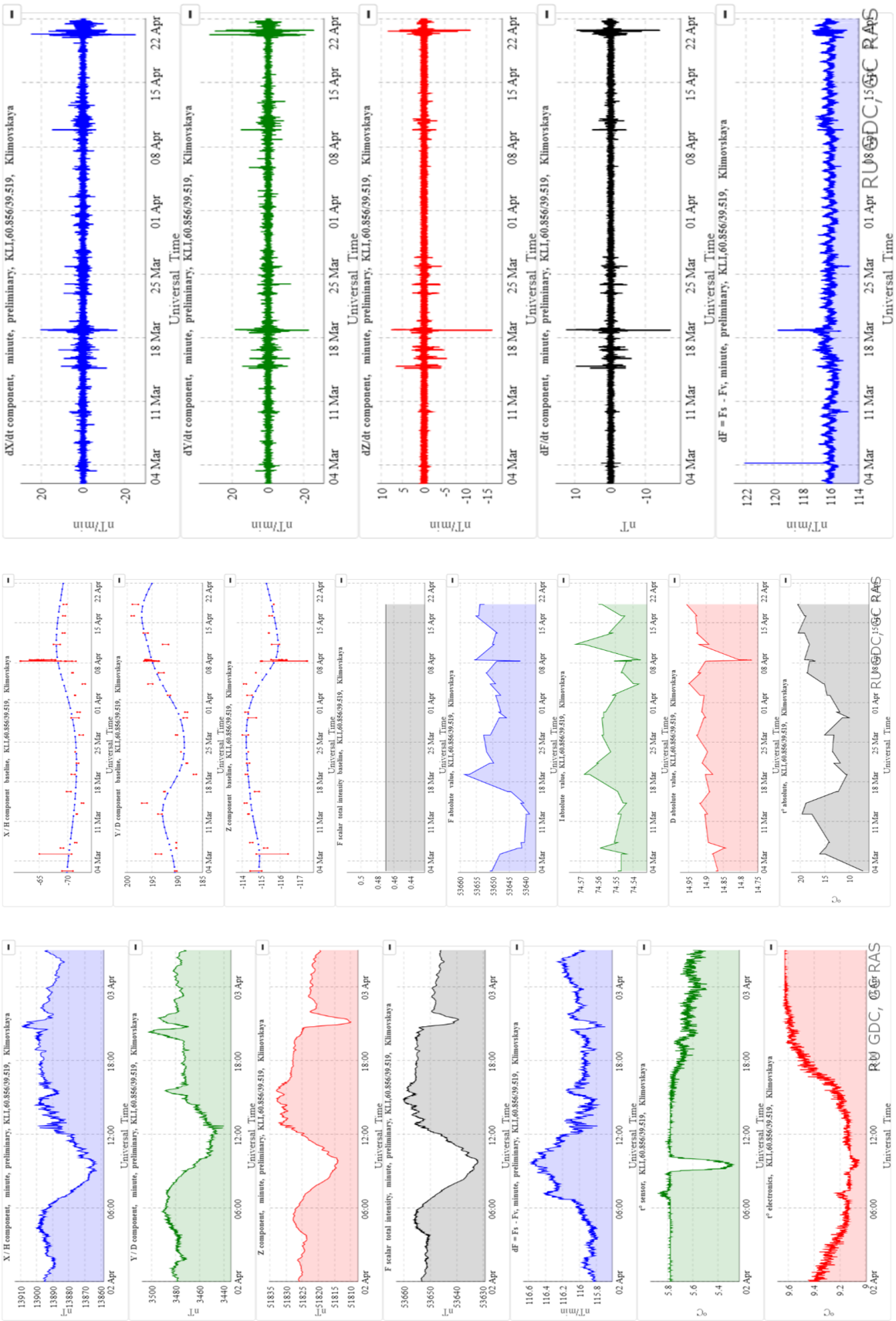
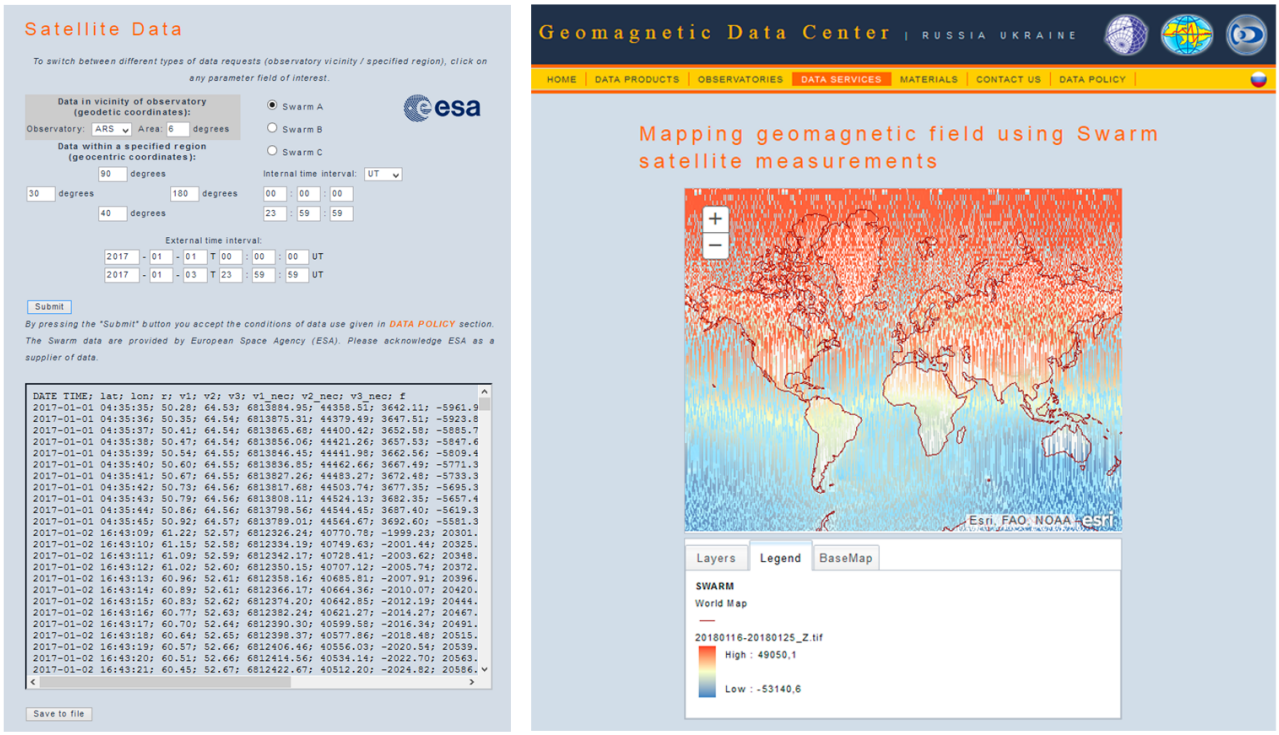


Рис. 14. Тематические наборы графиков: вариации и модуль вектора МПЗ, ΔF и температура (а); базисные и абсолютные данные (б); разностные производные B и ΔF (в) (http://geomag.gcras.ru/).



(а) (б)

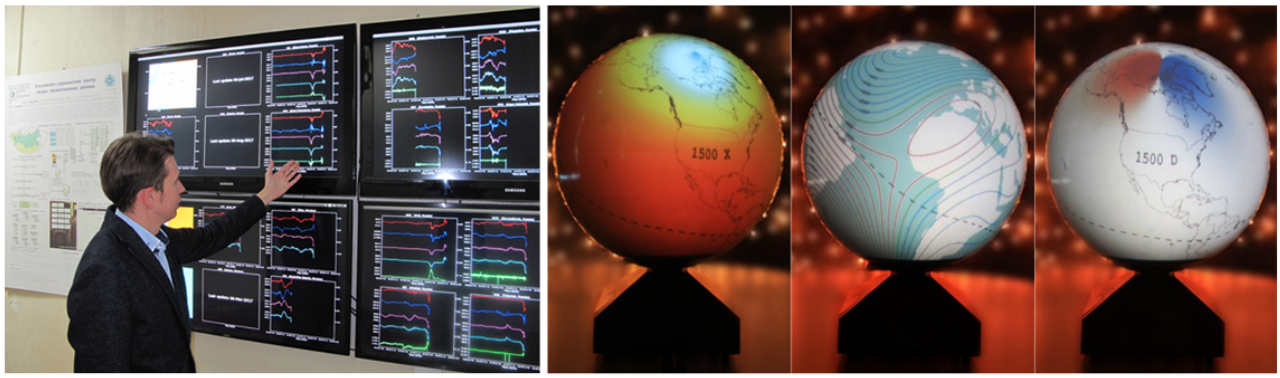
Рис. 15. Доступ к геомагнитным данным Swarm: веб-интерфейс доступа к цифровым массивам данных (а), онлайн ГИС-приложение (б) (http://geomag.gcras.ru/).

ются в растровые ГИС-слои и добавляются в общее хранилище геопространственных данных. Процедура повторяется с временным шагом 1 день, что соответствует периодичности обновления базы данных EKA, разрешение каждого растрового грида соответствует географической сетке с ячейками размером примерно $0,18 \times 0,18$ градусов (Рис. 15б).

Визуализация. Важная часть функционала МАГНУС – модули для визуализации накапливаемых данных. К ним относятся интерактивная визуализация геомагнитных данных онлайн, визуализация данных на видео-стенде (Рис. 16а) и визуализация данных на сферическом экране. Визуализация на сферическом экране помогает восприятию и пониманию фундаментальных процессов, происходящих на Земле, в ее недрах и околоземном пространстве. В Геофизическом центре РАН создана оригинальная проекционная система сферической визуализации “Орбус” и разработан ряд приложений [*Рыбкина и др.*, 2015]. В МАГНУС сферический экран используется для отображения результатов моделирования, которые представляют собой цифровые карты пространственных характеристик геомагнитного поля, а также спутниковых измерений Swarm (Рис. 16б).

Заключение

Системы геомагнитных наблюдений на Земле и в околоземном пространстве являются основой для фундаментальных исследований в области геомагнетизма [*Love*, 2008]. Развитие сетей стационарных наземных магнитных наблюдений включает в себя расширение сетей, повышение плотности покрытия Земли пунктами наблюдений, развертывание новых и оснащение существующих обсерваторий современной высокоточной магнитометрической аппаратурой, контроль за состоянием обсерваторий и качеством регистрируемых ими магнитограмм. Опыт Геофизического центра РАН в программе развёртывания магнитных обсерваторий российского сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ с 2010 г. позво-



(а) (б)

Рис. 16. Визуализация геомагнитных данных на видео-стенде (а) и сферическом экране (б).

лил выделить множество технических решений для установки полномасштабной обсерватории на всех этапах: поиск локации, строительство измерительных павильонов, установка визирной цели и определение её азимута, настройка приборов и передачи данных, организация электропитания и отопления обсерватории и т.д. Были разработаны руководства по проведению абсолютных измерений, расчёту квазиокончательных данных, систематизации хранения накапливаемых данных [*Соловьёв и др.,* 2017], а также сборники методических рекомендаций и технико-экономических решений для развёртывания магнитной обсерватории. Эти материалы обобщают опыт предшествующих работ и опыт, полученный Геофизическим центром РАН. Отдельного внимания заслуживает методика, выработанная ГЦ РАН для поиска места строительства новой магнитной обсерватории и внедряющая современные высокоточные методы геодезии в процедуру пешеходной магниторазведки [*Krasnoperov et al.,* 2015].

Ключевым достижением ГЦ РАН в области комплексного геомагнитного мониторинга в России является создание АПК МАГНУС – эффективной системы, осуществляющей сбор наземных и спутниковых магнитных данных, их хранение, управление, обработку и многофакторный анализ. Блок МАГНУС, обеспечивающий модельные расчеты различных электромагнитных параметров в недрах Земли и околоземном пространстве, позволил получить новые научные результаты в области космофизики и геомагнетизма (напр., [*Gvishiani et al.,* 2016; *Lukianova et al.,* 2017; *Soloviev et al.,* 2017]). Другим результатом, полученным благодаря МАГНУС, является ускорение создания квазиокончательных и окончательных обсерваторских данных из предварительных измерений. Рутинные операции с потоками магнитных данных, используемые в настоящее время во всем мире, были преобразованы из ручного в автоматизированный режим с помощью математических элементов искусственного интеллекта. Это привело к повышению точности окончательных данных [*Soloviev et al.,* 2018] и сокращению задержек при их подготовке по сравнению с зарубежными центрами данных. Это делает МАГНУС незаменимым инструментом, который объединяет непрерывные измерения сети российских обсерваторий и спутниковых данных в единой системе и унифицирует процедуры их анализа. Своевременное и надежное предоставление квазиокончательных данных имеет также важное значение в промышленном секторе экономики, в первую очередь, для поддержки высокотехнологичных процессов направленного бурения скважин при разведке и добыче углеводородного сырья [*Beggan et al.,* 2014; *Buchanan et al.,* 2013; *Gvishiani and Lukianova,* 2014].

Благодарности

Представленные в статье результаты получены на основе данных, зарегистрированных на геомагнитных обсерваториях. Мы благода-

рим национальные институты, обеспечивающие их работоспособность, и выражаем благодарность ИНТЕРМАГНЕТ за продвижение высоких стандартов в области геомагнитных наблюдений и Российско-украинскому центру геомагнитных данных за предоставление свободного онлайн-доступа к данным. Мы также благодарны Европейскому космическому агентству за своевременное предоставление геомагнитных данных спутников Swarm. В работе использовались данные и алгоритмы ЦКП "Аналитический центр геомагнитных данных" Геофизического центра РАН. С российской стороны работа выполнена в рамках гранта РФФИ №18-55-05006 (Арм_а) "Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий", с армянской – в рамках проекта Государственного комитета по науке Министерства образования и ауки Республики Армения №18RF-096.

Литература

Березко, А. Е., А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, и др. (2008), Интеллектуальная географическая информационная система "Данные наук о Земле по территории России", *Инженерная экология*, No. 5, 32–40.

ИГФ (2017), Первая общероссийская сверка абсолютных магнитометров, проведенная в геофизической лаборатории-обсерватории "Арти" с 20 по 22 сентября 2017 г. (отчет), с.66, ИГФ УрО РАН, Екатеринбург.

Рыбкина, А. И., А. Е. Бобков, О. Е. Никифоров, О. О. Пятыгина (2015), Программно-аппаратный комплекс для визуализации геофизических данных на сферическом экране, *Научная визуализация*, *7*, No. 2, 38–49.

Соловьёв А., Р. Лукьянова, М. Добровольский, и др. (2017), Сбор и систематизация информации для базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях, *Earth, Planets and Space*, *5*, BS5003, **Crossref**

Хомутов, С. Ю., В. А. Сапунов, А. Ю. Денисов, и др. (2016), Оверхаузеровский компонентный магнитометр POS-4: результаты непрерывных измерений в 2015–2016 гг. на геофизической обсерватории Паратунка ИКИР ДВО РАН, Камчатка, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, No. 42, 106–111.

Agayan, S., S. Bogoutdinov, A. Soloviev, R. Sidorov (2016), The study of time series using the DMA methods and geophysical applications, *Data Science Journal*, *5*, No. 16, 1–21, **Crossref**

Agayan, S. M., et al. (2018), Short introduction into DMA, *Russian Journal of Earth Sciences*, *18*, ES2001, **Crossref**

Barbosa, C., L. Alves, R. Caraballo, et al. (2015), Analysis of geomagnetically induced currents at a low-latitude region over the solar cycles 23 and 24: comparison between measurements and calculations, *Journal of Space Weather and Space Climate*, *5*, No. A35, 9, **Crossref**

Bartels, J. (1938), Potsdamer erdmagnetische Kennziffern, *Zeitschrift für Geophysik*, No. 14, 68–78.

Bartels, J., N. H. Heck, N. H. Heck, H. F. Johnson (1939), The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, No. 44, 411–454.

Beggan, C., S. Macmillan, E. Clarke, B. Hamilton (2014), Improving models of the Earth's magnetic field for directional drilling applications, *First Break*, *32*, No. 3, 53–60, **Crossref**

Buchanan, A., C. A. Finn, J. Love, E. W. Worthington (2013), Geomagnetic referencing – the real-time compass for directional drillers, *Oilfield Review*, *25*, No. 3, 32–47.

ESDB (2015), Geomagnetic data recorded at Geomagn. Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI), ESDB repository. Geophysical Center RAS, **Crossref**

ESDB (2016), Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory St. Petersburg (IAGA code: SPG), ESDB repository. Geophysical Center RAS, **Crossref**

Friis-Christensen, E., H. Lühr, G. Hulot (2006), Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field, *Earth, Planets and Space*, *58*, No. 16, 351–358, **Crossref**

GFZ (2016), Indices of Global Geomagnetic Activity, Helmholz Centre, Potsdam. (URL: http://www.bcmt.fr/, дата обр. 25.09.2016)

Gvishiani, A. D., R. Yu. Lukianova (2014), Geomagnetic support of the down the hole controlled drilling in the Arctic region, *The Arctic Herald*, No. 45, 114–123.

Gvishiani, A. D., S. M. Agayan, Sh. R. Bogoutdinov, et al. (2004), Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies, *System Research and Information Technology*, No. 3, 7–16. (in Ukrainian)

Gvishiani, A. D., S. M. Agayan, Sh. R. Bogoutdinov, J. Zlotnicki, J. Bonnin (2008), Mathematical methods of geoinformatics. III. Fuzzy comparisons and recognition of anomalies in time series, *Cybernetics and Systems Analysis*, *44*, No. 3, 309–323, **Crossref**

Gvishiani, A., R. Lukianova, A. Soloviev, A. Khokhlov (2014), Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them, *Surveys in Geophysics*, *35*, No. 5, 1123–1154, **Crossref**

Gvishiani, A., A. Soloviev, R. Krasnoperov, R. Lukianova (2016), Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment, *Data Science Journal*, *15*, No. 18, 1123–1154, **Crossref**

Haagmans, R., R. Bock, H. Rider (2013), Swarm: ESA's magnetic field mission, ESA Communications, BR-302, 2nd edn., ESA, Netherlands.

Jankowsky, J., C. Sucksdorff (1996), *Guide for*

Magnetic Measurements and Observatory Practice, 238 с. IAGA, Warshaw.

Krasnoperov, R. I., R. V. Sidorov, A. A. Soloviev (2015), Modern Geodetic Methods for High-Accuracy Survey Coordination on the Example of Magnetic Exploration, *Geomagnetism and Aeronomy*, *55,* No. 4, 547–554, **Crossref**

Love, J. J. (2008), Magnetic monitoring of Earth and space, *Physics Today*, *61,* No. 2, 31–37, **Crossref**

Lukianova, R., F. Christiansen (2006), Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents, *J. Geoph. Res.*, *111,* No. A03213, 1–11, **Crossref**

Lukianova, R. Y., V. M. Uvarov, P-D. Coisson (2017), High-latitude *F* region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions, *Advances in Space Research*, *59,* No. 2, 557–570, **Crossref**

Narkhov, E., L. Muravyev, A. Sergeev, et al. (2017), Applications of modern high-precision Overhauser-magnetometers, *AIP Conference Proceedings*, *1886,* No. 020075, 557–570, **Crossref**

Olsen, N., E. Friis-Christensen, R. Floberghagen, et al. (2013), The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and swarm data products, *Earth, Planets and Space*, *65,* No. 11, 1189–1200, **Crossref**

Peltier, A., A. Chulliat (2010), On the feasibility of promptly producing quasi-definitive magnetic observatory data, *Earth, Planets, Space*, *62,* No. 2, e5–e8, **Crossref**

Rasson, J. L. (2005), About Absolute Geomagnetic Measurements in the Observatory and in the Field, *Publication Scientifique et Technique, Malcorps, D. (ed.), No. 040* c.43, L'Institut Royal Meteorologique de Belgique, Brussels.

Reay, J., D. Herzog, A. Sobhana, et al. (2011), Magnetic observatory data and metadata: types and availability, *Geomagnetic Observations and Models, Mandea, M. and Korte, M. (eds.)* c.149–181, Springer Science+Business Media B.V., The Netherlands. **Crossref**

Russian-Ukrainian Geomagnetic Data Center (2017), re3data.org – Registry of Research Data Repositories, **Crossref**

Reda, J., D. Fouassier, A. Isac, et al. (2011), Improvements in geomagnetic observatory data quality, *Geomagnetic Observations and Models: Springer Science+Business Media B.V.*, *5,* 127–148. (IAGA Special Sopron Book Series)

Roberts, F. S. (2016), What is Big Data and how has it changed, *Geoinf. Res. Papers Ser.*, *4,* No. BS4002, 18–21, **Crossref**

Science International: Open Data in a Big Data World (2015), *An International Accord Extended Version*, 17 с. International Council for Science (ICSU), International Social Science Council (ISSC), The World Academy of Sciences (TWAS), InterAcademy Partnership (IAP), Paris.

Sidorov, R., A. Soloviev, R. Krasnoperov, et al. (2017), Saint Petersburg magnetic observatory: from Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification, *Geoscientific. Instrumentation. Methods and Data Systems*, *6,* 473–485, **Crossref**

Soloviev, A. A., Sh. R. Bogoutdinov, S. M. Agayan, et al. (2009), Detection of hardware failures at INTERMAGNET observatories: application of artificial intelligence techniques to geomagnetic records study, *Russian Journal of Earth Sciences*, *11,* No. 2, ES2006, **Crossref**

Soloviev, A. A., S. M. Agayan, A. D. Gvishiani, et al. (2012a), Recognition of disturbances with specified morphology in time series: Part 2. Spikes on 1-s magnetograms, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, *48,* No. 5, 395–409, **Crossref**

Soloviev, A., A. Chulliat, S. Bogoutdinov, et al. (2012b), Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory, *Earth, Planets and Space*, *64,* No. 9, 743–752, **Crossref**

Soloviev, A. A., R. V. Sidorov, R. I. Krasnoperov, et al. (2016), Klimovskaya: A New Geomagnetic Observatory, *Geomagnetism and Aeronomy*, *56,* No. 3, 342–354, **Crossref**

Soloviev, A., A. Chulliat, S. Bogoutdinov (2017), Detection of secular acceleration pulses from observatory data, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *270,* 128–142, **Crossref**

Soloviev, A., D. Lesur, D. Kudin (2018), On the feasibility of routine baseline improvement in processing of geomagnetic observatory data, *Earth, Planets and Space*, No. 70:16, 128–142, **Crossref**

St-Louis, B. J., E. A. Sauter, D. F. Trigg, R. L. Coles, D. Regimbald (2012), *INTERMAGNET Technical Reference Manual. Version 4.6.*, 100 с. INTERMAGNET, Edinburgh. (http://www.intermagnet.org/publications/intermag _4-6.pdf)

Контакт: Р. В. Сидоров, Геофизический центр Российской академии наук, ул. Молодежная, д. 3, 119296, г. Москва, Россия. (r.sidorov@gcras.ru)