

Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций

А.В. Воробьев^{1,2}, В.А. Пилипенко^{2,3}, Т.А. Еникеев¹, Г.Р. Воробьева¹

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12,

²Геофизический центр РАН, 119296, Россия, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3,

³Институт физики Земли, 123995, Россия, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1

Аннотация

Основываясь на данных наблюдения магнитных обсерваторий и вариационных станций, публикуемых на портале SuperMAG, предлагается и верифицируется подход к построению специализированной веб-ГИС на базе микросервисной архитектуры, обеспечивающей аналитический контроль возмущенной составляющей вариаций геомагнитного поля.

Реализованный в рамках данной системы метод пространственной интерполяции геомагнитных данных в совокупности с предложенной схемой их ранжировки и интерпретации, а также способом визуализации в виде изолиний позволяет отслеживать структуру, наблюдать динамику, выявлять вероятные регионы, длительность и временные интервалы возникновения экстремальных геомагнитных возмущений.

Ключевые слова: геоинформационная система, геомагнитные данные, геопрограммный анализ, геостатистика, геомагнитные возмущения.

Цитирование: Воробьев, А.В. Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций / А.В. Воробьев, В.А. Пилипенко, Т.А. Еникеев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 782-790. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-707.

Citation: Vorobev AV, Pilipenko VA, Enikeev TA, Vorobeva GR. Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations. Computer Optics 2020; 44(5): 782-790. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-707.

Введение

Вариации геомагнитного поля (ГМП) являются одним из ключевых параметров, определяющих эффективность воздействия космической погоды на геосферные оболочки. Эти вариации ответственны за возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в трубопроводах, линиях электропередач (ЛЭП), трансокеанских кабелях, системах автоматики железных дорог и др. [1–2]. В периоды геомагнитной активности (ГМА) на высоких широтах происходят значительные вариации магнитного склонения, достоверные значения которого необходимы при скважинных инклинометрических измерениях, а также проверке инклинометрических систем. Так, например, во время магнитной бури 28–31 октября 2003 г. на территории российского арктического шельфа из-за эффекта ионосферных электроджетов были зарегистрированы спорадические возмущения магнитного склонения, сопоставимые по своей величине со склонением главного магнитного поля Земли [3].

Однако быстрые геомагнитные возмущения (ГМВ), ответственные в том числе за возбуждение интенсивных всплесков ГИТ, нельзя характеризовать исключительно статической картиной распределения мощности возмущения по земной поверхности. Для таких возмущений, какдвигающийся к западу изгиб полярных сияний (WTS – westward traveling surge) во время активной фазы суббури, конвективные ионо-

сферные вихри (travelling convection vortices), импульсные возмущения ГМП (magnetic impulse events), эффекты пространственного распространения вдоль земной поверхности и их временная эволюция неразрывно связаны. Скорость вариаций, вызванных такими динамическими возмущениями ГМП, может превышать вариации, наблюдаемые во время магнитной бури 1986 г., повлекшей нарушение высокочастотной радиосвязи по всему миру и множественные локальные сбои в энергосистемах канадской провинции Квебек [4]. Динамика географических границ вероятного появления таких магнитных вариаций, которые можно было бы отнести к опасным природным явлениям (т.е. способным нанести вред объектам народного хозяйства), представляет особую важность.

До недавнего времени изучение пространственно-временной структуры вариаций ГМП традиционно проводилось исключительно с использованием цепочек станций, ориентированных либо вдоль геомагнитного меридиана, либо параллели. Однако в последнее время в ряде фундаментальных задач геомагнетизма широкое распространение получают различного рода геоинформационные системы (ГИС), применяемые, как правило, для анализа структур ГМВ в глобальном или региональном масштабах.

Так, на сегодняшний день специалисты посредством программного обеспечения с элементами ГИС исследуют характер пространственного распределе-

ния возмущений ГМП и его вариабельности (производных по времени dB/dt) [5], выделяют локализованные вихревые структуры [6], строят и анализируют кеогаммы, показывающие динамику широтного распределения геомагнитной возмущенности [7] и т. п. При этом используемое программное обеспечение обычно представляет собой настольные, часто несовместимые версии программных продуктов или картографических подложек.

Ранее в работах [8–9] предлагались подходы к веб-ориентированной визуализации параметров ГМП внутренних источников (рис. 1), однако вопросы, касающиеся отображения космогенных вариаций ГМП, до сих пор остаются открытыми, хотя попытки создания такого рода систем известны: сервисы порталов INTERMAGNET и SuperMAG (рис. 2).

Вообще говоря, основной миссией данных порталов является сбор, обработка, унификация и хранение геомагнитных данных, собираемых со множества (в случае

SuperMAG более 500) магнитных обсерваторий и вариационных станций, неравномерно распределенных по поверхности Земли. В некоторых случаях здесь же публикуются разного рода индексы ГМА, характеризующие, например, магнитную возмущенность в зоне полярных сияний, обусловленную усилением токов в ионосфере, протекающих вдоль границы аврорального овала (порталы SuperMAG, IMAGE и др.).

Однако, как показывает опыт, сервисы для пространственной визуализации параметров ГМП, входящие в состав таких порталов, в основе своей имеют примитивные средства визуализации, слабо развитый интерфейс и практически отсутствующий функционал, что в совокупности является значимым препятствием на пути эффективной работы с большими объемами пространственно-распределенных геомагнитных данных и в конечном итоге затрудняет понимание физики соответствующих природных явлений и процессов.

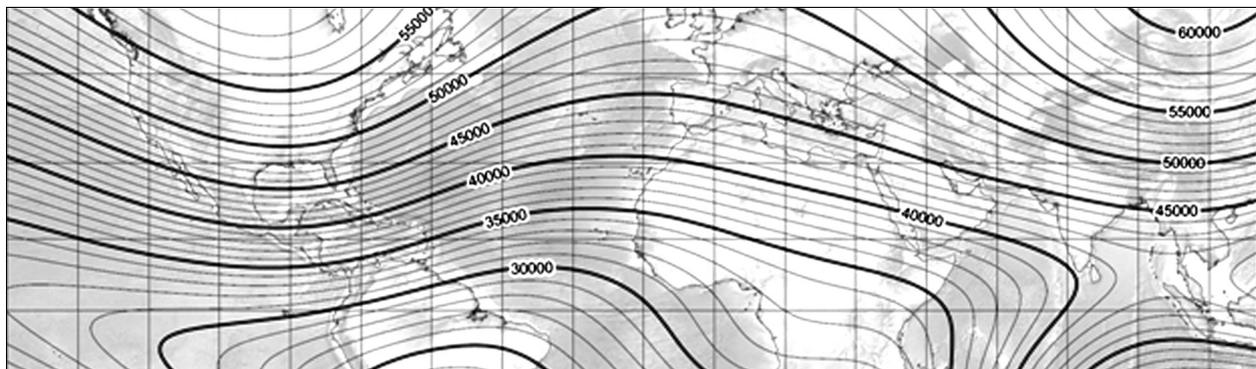


Рис. 1. Результат веб-ориентированной визуализации полного вектора главного магнитного поля Земли (IGRF модель) в виде KML-слоя

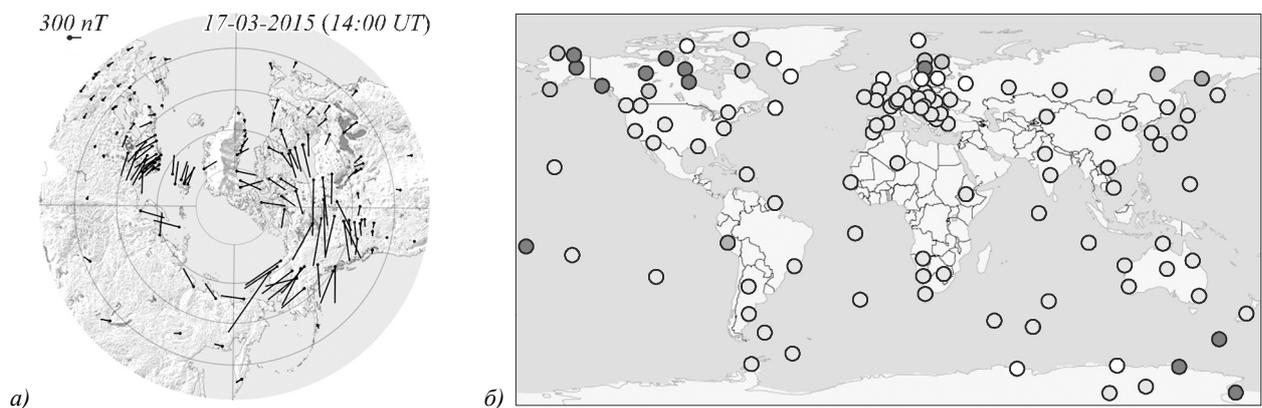


Рис. 2. Результат веб-визуализации геомагнитных возмущений (2015-03-17 14:00 UT) посредством порталов SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/rBrowse/>) (а) и INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org/activitymap/activitymap-eng.php>) (б)

Таким образом, разработка и создание качественно новой веб-ГИС, обеспечивающей возможность анализа параметров возмущенной составляющей ГМП как в статическом, так и в динамическом режимах, а также ее последующая интеграция с хранилищем геомагнитных данных (например, таким как SuperMAG, INTERMAGNET или Российско-украинский центр гео-

магнитных данных), является актуальной научно-технической задачей.

1. Исходные данные

В качестве исходных данных используются трехкомпонентные геомагнитные данные, имеющиеся в открытом доступе на портале SuperMAG в геомагнитной

системе координат N, E, Z . Из всего доступного объема информации для эксперимента и апробации результатов были отобраны данные за 5 суток за 2015 г. (17 марта, 23 июня, 11 сентября, 7 октября и 20 декабря), включающие в себя как магнитоспокойные периоды, так и сильные ГМВ. Общее число доступных источников данных по состоянию на рассматриваемые периоды составляло от 190 до 225 (из 542) магнитных обсерваторий и вариационных станций. Исключение годового тренда и суточных вариаций ГМП осуществляется согласно разработанному SuperMag алгоритму [10–11].

2. Обработка, визуализация и интерпретация геомагнитных данных

В табл. 1 представлен адаптированный для веб-реализации алгоритм, обеспечивающий обработку, визуализацию и интерпретацию геомагнитных данных, представленных в виде файла csv-формата с внутренней структурой, принятой в SuperMAG. Так, в общем виде каждый файл представляет собой набор временных рядов за одни сутки по всем доступным на данный период магнитным обсерваториям и вариационным станциям.

Табл. 1. Алгоритм построения изодинам

Шаг	Описание	Используемые библиотеки
1	Выбор даты, времени и анализируемого параметра ГМП через пользовательский интерфейс	jquery.min.js, bootstrap.min.js, bootstrap-select.min.js, bootstrap-timepicker.min.js, bootstrap-toggle.min.js
2	Предварительная обработка исходных геомагнитных данных	Pandas, Numpy, Datetime
3	Веб-ориентированная визуализация исходных картографических данных	Leaflet
4	Геопространственная интерполяция параметров ГМП	Turf.js
5	Построение изодинам (изолиний) согласно предложенным в табл. 1–2 шкалам диапазонов значений	Turf.js, Leaflet
6	Интерпретация и вывод результатов	Leaflet

На начальных этапах процедуры обработки (Шаги 1–2) производится загрузка данных станций наземных наблюдений, а также выполняется анализ временных рядов на предмет выбросов и пропущенных значений [12]. Далее по клиентскому запросу сервер возвращает (в виде списка точечных объектов с атрибутами в формате GeoJSON) срез данных по доступным магнитным обсерваториям и вариационным станциям за выбранный пользователем момент времени.

Здесь отметим, что в случае, если бы значения параметров ГМП за достаточно длинный промежуток времени (например, 1 год) соответствовали нормальному закону распределения, то для выявления аномалий во временных рядах достаточно было бы воспользоваться правилом трех сигм или критерием Райта [13]. Однако по причине того, что возмущенные вариации (в зависимости от места их наблюдения) чаще всего описываются логнормальным, степенным, экспоненциальным или обобщенным нормальным законами распределений [14, 15], то методика обнаружения выбросов требует некоторой модернизации и в конечном итоге может быть реализована в следующем виде:

- построение гистограммы для выборки минутных значений каждого параметра ГМП за 1 год (525600 значений);
- выбор (на основании критериев Колмогорова и Смирнова [16]) и определение параметров формы наилучшим образом подходящего для данной выборки закона распределения [4, 14, 15];
- определение границ диапазона, вероятность нахождения значений внутри которого для данно-

го закона распределения с заданными параметрами формы не менее 99,9 %;

– удаление значений временного ряда, не соответствующих установленному диапазону, и их последующее восстановление методом линейной интерполяции. Восстановленные данные помечаются и при необходимости могут быть исключены пользователем из общей выборки. (Отметим, что любая процедура восстановления данных так или иначе вносит дополнительную методическую погрешность в результат измерений. Однако, согласно исследованиям [17], например, для среднеширотных магнитных станций в магнитоспокойный период методом линейной интерполяции могут быть восстановлены фрагменты минутных геомагнитных данных размером до 10 мин со среднеквадратической ошибкой, не превышающей $\pm 0,5$ нТл, что сопоставимо с аппаратной погрешностью самих станций.)

На следующем этапе (Шаг 3) из данных, представленных в формате GeoJSON, генерируется массив X_0 , элементы которого являются точечными пространственными данными, а размер определяется числом магнитных станций. Далее из массива X_0 формируется массив X_1 , таким образом, что каждый элемент x_{1j} содержит географические координаты, стиль отображения и ряд дополнительных атрибутов (название, код станции и значение анализируемого параметра в запрошенный момент времени). Далее в соответствии с пользовательскими настройками все элементы массива X_1 размещаются на картографической подложке, и к каждому из них привязывается метка с атрибутивными данными.

На 4-м этапе алгоритма из массива X_0 создается необходимый для последующей пространственной интерполяции массив точечных объектов X_2 , размер которого определяется числом точек регулярной сетки.

Пространственная интерполяция в данной работе реализуется методом обратно взвешенных расстояний в модификации Шепарда, основная идея которого заключается в предположении того, что чем менее удалены точки друг от друга, тем ближе должны быть их значения [18].

Результаты исследований [19] косвенно подтверждают возможность применения данного метода, однако с некоторыми ограничениями, устанавливаемыми эмпирическим путем и накладываемыми на шаг координатной сетки ($n = m = 200$, где n и m – расстояние, км, по горизонтали (по долготе) и вертикали (по широте) соответственно) и географическую область его применения.

Таким образом, согласно IDW-методу (от англ. Inverse Distance Weighting), интерполируемое значение параметра ГМП в произвольной точке географического пространства, находящейся внутри полигона (в данном случае прямоугольного), включающего детерминированные значения, будет определяться средне-взвешенной суммой этих детерминированных значений. В случае модификации Шепарда уровень влияния детерминированной точки на искомое значение определяется показателем степени p в выражении (1), т.е. с удалением от вершины полигона ее влияние на интерполируемое значение ослабевает по экспоненте.

Значение весового коэффициента p подбирается эмпирически из того же соображения, что чем более удалена точка с детерминированным значением от точки, для которой значение необходимо вычислить,

тем меньшее влияние на искомое значение она должна оказывать (в данной работе $p = 2,5$).

$$v' = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} v_i \div \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}, \tag{1}$$

где v' – вычисляемое (интерполируемое) значение для текущей точки, n – число точек с известным значением, v_i – значение i -й детерминированной точки, d – расстояние между искомой и текущей точкой, p – весовой коэффициент.

Применяя выражение (1) для каждого x_{2j} и записывая результат в его свойство, на выходе имеем массив точек регулярной сетки, содержащих интерполированные значения анализируемого параметра.

Таким образом, в результате IDW-интерполяции генерируется объект, представляющий собой регулярную сетку с заданным шагом, каждый узел которой содержит интерполированное значение.

Далее (Шаг 5), имея равномерно распределенные значения, представляется возможным построить соответствующие им изодинамы – изолинии одинаковых напряженностей ГМП для параметра, установленного пользователем.

С целью повышения информативности визуализации и равномерного распределения числа изолиний по всему диапазону значений используется квазилгарифмическая ранжировка (табл. 2). При этом качественная классификация диапазонов была предложена в соответствии с ожидаемым эффектом воздействия вариаций ГМП на технические объекты [20]. Таким образом, представленная шкала обеспечивает информативную визуализацию параметров геомагнитных возмущений с сопоставимым разрешением как в приэкваториальных, так и в полярных областях.

Табл. 2. Шкала диапазонов значений возмущенных вариаций вектора ГМП

Слабое возмущение: зелено-желтый градиент		Умеренное возмущение: желто-красный градиент		Сильное возмущение: красно- черный градиент	
нТл	нТл/мин	нТл	нТл/мин	нТл	нТл/мин
$ N < 200$	$ dN/dt < 50$	$200 < N < 1000$	$0 < dN/dt < 400$	$ N > 1000$	$ dN/dt > 400$
$ E < 400$	$ dE/dt < 100$	$400 < E < 1600$	$0 < dE/dt < 500$	$ E > 1000$	$ dE/dt > 500$
$ Z < 400$	$ dZ/dt < 80$	$400 < Z < 1800$	$0 < dZ/dt < 700$	$ Z > 1000$	$ dZ/dt > 700$
$F < 200$	$ dF/dt < 60$	$200 < F < 900$	$0 < dF/dt < 700$	$F > 1000$	$ dF/dt > 700$

Генерация изолиний по равномерной сетке значений осуществляется на базе данных массива X_2 , методом «Marching squares» [21]. Результатом является новый массив X_3 , содержащий полилинии число которых определяется диапазоном значений анализируемого параметра на данный момент времени, а также характером его геопространственного распределения.

На заключительном этапе (Шаг 6) на базе массива X_3 создается массив X_4 , содержащий изодинамы, стилизованные в соответствии с табл. 2, которые в результате и отображаются на картографической подложке.

3. Модель и архитектура веб-ГИС

Разработанная на основе предложенного алгоритма веб-ориентированная ГИС функционирует по

принципам трехуровневого клиент-серверного взаимодействия и использует элементы микросервисной архитектуры для интеграции в систему программных библиотек обработки и визуализации пространственных данных (рис. 3).

Клиентская сторона ГИС в соответствии с традиционной трехуровневой клиент-серверной архитектурой представлена веб-браузером, функционирующим на вычислительных устройствах любого типа, который реализует пользовательский интерфейс, формирует запросы к веб-серверу и выполняет обработку откликов от него.

Взаимодействие между клиентской и серверной сторонами ГИС осуществляется посредством прото-

кола HTTP(s) с помощью пар сообщений типа «запрос – отклик». При этом на серверной стороне формирование ответа на пользовательский запрос реализуется посредством фреймворка Django, обеспечивающего возможности аналитической обработки и визуализации пространственных данных с помощью языка программирования Python и разработанных на его основе библиотек. В частности, компоненты сер-

верного фреймворка реализуют обращение к геомагнитным данным, их обработку, анализ и формирование исходящего на клиентскую сторону HTML-потока. При этом разделение серверной компоненты на сервер данных и сервер логики является только логическим. Файлы программных сценариев и геомагнитных данных в csv-подобном формате физически размещаются в одной виртуальной директории.

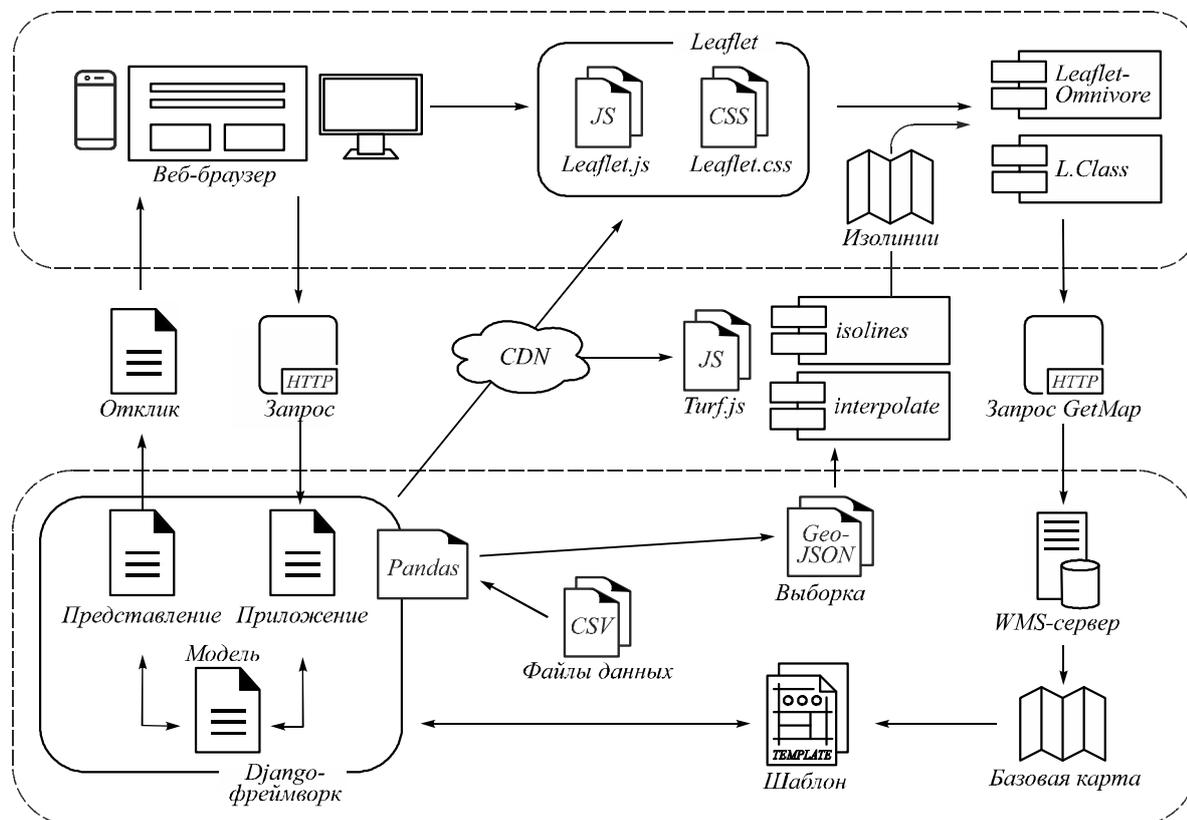


Рис. 3. Клиент-серверная архитектура веб-ГИС для аналитического контроля параметров геомагнитных вариаций

В процессе клиент-серверного взаимодействия на начальном этапе запрос от пользователя попадает в контроллер (URL Dispatcher), состоящий из списка правил сопоставления регулярного выражения (по сути, URL) и вызываемой функции. Описанная контроллером функция задана представлением (View), используемым для формирования бизнес-логики приложения, которая описывает обращение к источнику геомагнитных данных, обработку полученного результата и формирование отклика для передачи пользователю. Результат выполнения представления интегрируется в шаблон (Template) для формирования HTML-потока, направляемого в качестве отклика на клиентскую сторону.

Микросервисная составляющая веб-ГИС представлена сторонними компонентами, обеспечивающими обработку и визуализацию геомагнитных данных. Подключение модулей-сервисов описывается в коде шаблона фреймворка и ввиду условной статичности используемых библиотек осуществляется на клиентской стороне с помощью технологии CDN

(content delivery network), для повышения вычислительной скорости веб-приложения использующей территориально распределенные серверы для распространения статичного содержимого.

Формирование и визуализация картографической информации в виде базовой карты для рендеринга на клиентской стороне реализованы посредством открытой легковесной JS-библиотеки Leaflet с использованием географически привязанных изображений, генерируемых картографическим сервером на основе пространственных данных в соответствии с открытыми протоколами сетевой картографии WMS (Web Map Service). Базовая карта включает в себя главные картографические слои (гидрография, административные границы, дороги и др.), необходимые для более информативной визуализации пространственного распределения геомагнитных данных.

Библиотека Leaflet используется для визуализации данных только формата GeoJSON. Для рендеринга данных, размещенных на сервере и представленных в CSV-подобном формате IAGA2002, использован до-

полнительный программный модуль Leaflet-Omnivore. Последний, в свою очередь, базируется на функциональности модуля csv2geojson, обеспечивающего конвертирование пространственных данных формата CSV в формат GeoJSON.

Взаимодействие с WMS-сервером для получения базовой карты и ее визуализации на клиентской стороне осуществляется основным Leaflet-классом L.Class, который поддерживает функции объектно-ориентированного программирования и используется для работы с большинством других программных классов, а также поддерживает дополнительные параметры наследования. Класс L.Class при этом обеспечивает не только получение базовой картографической информации от удаленного сервера, но также рендеринг этих данных в окне пользовательского браузера в аппаратно-независимом режиме.

Решение задач пространственного анализа реализовано посредством программной JS-библиотеки Turf с открытым исходным кодом, позволяющей анализировать, агрегировать и преобразовывать пространственные данные на клиентской стороне на уровне веб-браузера. В частности, в разработанной веб-ГИС Turf-модуль Interpolate обеспечивает построение на основе исходных геомагнитных данных сплошной поверхности с заданным размером шага сетки. В результате интерполяции возможно оценить пространственное распределение геомагнитных данных на основании известных данных, зарегистрированных магнитными обсерваториями и вариационными станциями. При этом визуализация сформированного набора пространственных геомагнитных данных реализована посредством Turf-модуля Isolines, обеспечивающего генерацию набора пространственных объектов для последующего рендеринга на клиентской стороне. Помимо перечисленных, в разработанной веб-ГИС используется ряд сторонних программных библиотек фронтэнд-уровня, реализующих пользовательский интерфейс приложения в виде набора интерактивных визуальных элементов управления (выбор даты и времени, раскрывающиеся списки и пр.).

4. Анализ и обсуждение результатов

Предложенные алгоритм, модель и архитектура реализованы в виде специальной геоинформационной системы, доступной по адресу <https://geomagnetic.ru/> и в настоящее время находящейся на стадии открытого бета-тестирования. В общем виде ГИС включает в себя три сервиса, обеспечивающих наблюдение параметров вариаций ГМП во времени, пространстве и в динамическом режиме. Шаг дискретизации по времени динамического режима визуализации по умолчанию составляет 1 мин и может быть изменен пользователем. При выборе шага дискретизации следует учитывать, что формирование одной сцены пространственного распределения возмущенной составляющей ГМП зависит от параметров соединения и в

среднем занимает 1,5–2 с машинного времени. Иными словами, на формирование динамической минутной модели ГМП за сутки может потребоваться ~ 48 мин. машинного времени. Таким образом, в данном случае имеет смысл увеличить шаг дискретизации до приемлемого значения, тем самым пропорционально сокращая время обработки данных.

На рис. 4 в качестве примера представлены экранные формы результата динамического моделирования пространственного распределения компонент вектора возмущенной составляющей ГМП в течение 15-минутного фрагмента главной фазы магнитной бури 17 марта 2015 г. (буря св. Патрика) [7] с шагом дискретизации 5 мин.

Очевидно, что применение такого подхода, помимо уточнения характера распределения традиционных параметров ГМП, обеспечивает возможность оценки ряда дополнительных параметров, например, таких как скорость изменения площади земной поверхности S , внутри которой какой-либо параметр ГМП B превышает (не превышает) пороговое значение B_0 :

$$\frac{dS}{dt_{B>B_0}}$$

Кроме этого, согласно результатам моделирования (рис. 5а), на западном полушарии одним из эпицентров максимальной варибельности (скорости изменения) северной составляющей геомагнитных возмущений является область, находящаяся на территории канадских провинций Квебек, Онтарио, Манитоба и северных штатов США, что, учитывая статистические взаимосвязи между параметрами геомагнитной активности и ГИТ [14,22], а также историю наблюдения экстремальных ГИТ (например, Квебекское событие 1989 г, США 2003 г и др. [20, 23–24]), выглядит вполне оправданно.

Если рассматривать восточное полушарие, то здесь, согласно данным наблюдения, коррелирующим с результатом моделирования (рис. 5б), максимальная варибельность наблюдается преимущественно на территории Скандинавского и Кольского полуостровов [23].

Таким образом, сопоставляя известные данные о воздействиях вариаций ГМП на различного рода технические объекты и системы, распределенные в пространстве, с полученными результатами пространственного моделирования вариаций ГМП (рис. 4–5), можно сделать вывод о том, что методы представленной ГИС хорошо детерминируют область экстремального воздействия ГМП на техносферу, вероятные границы которой, очевидно, определяются авроральным овалом.

К ограничениям предложенного метода по-видимому следует отнести то, что реализованная в виде веб-ГИС модель пространственного распределения параметров ГМП не предусматривает экстраполяцию данных, в связи с чем необходимая достоверность моделирования обеспечивается исключительно внутри зоны покрытия земной поверхности магнитными обсерваториями и вариационными станциями.

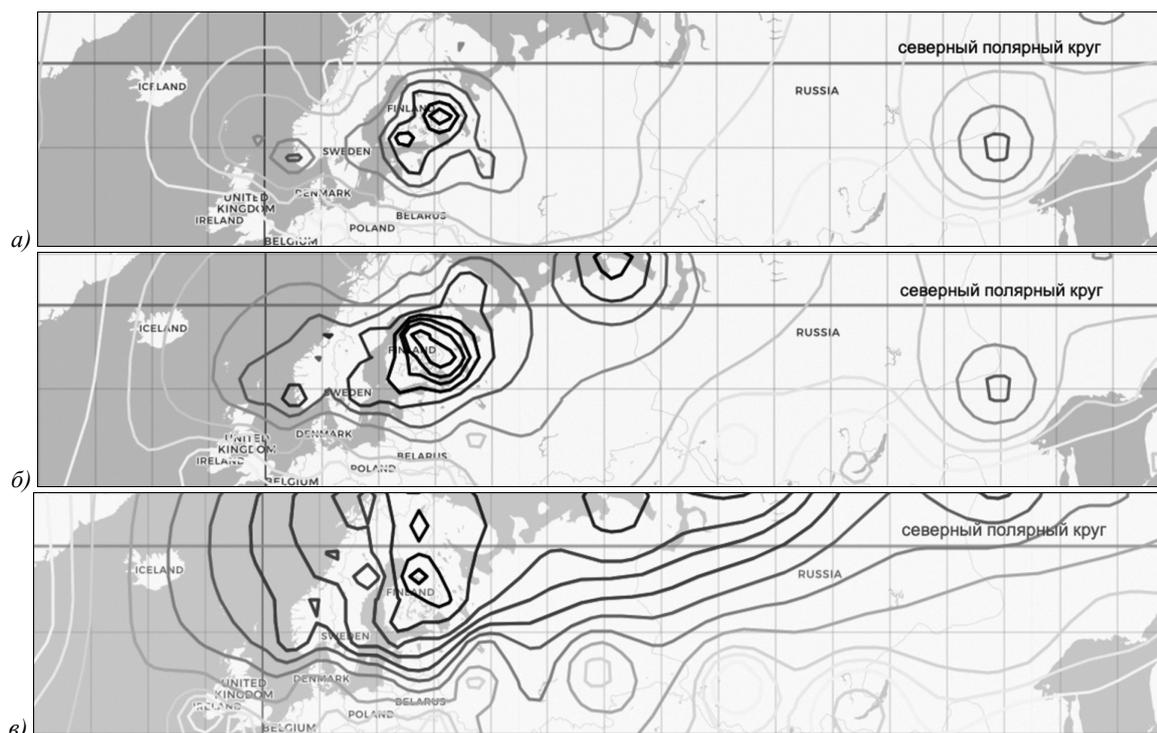


Рис. 4. Экранные формы результатов работы предложенной веб-ГИС (<https://geomagnetic.ru>): моделирование пространственного распределения вариаций полного вектора магнитного поля Земли в течение фрагмента главной фазы бури св. Патрика: а) 2015-03-17_23:05 UT; б) 2015-03-17_23:10 UT; в) 2015-03-17_23:15 UT

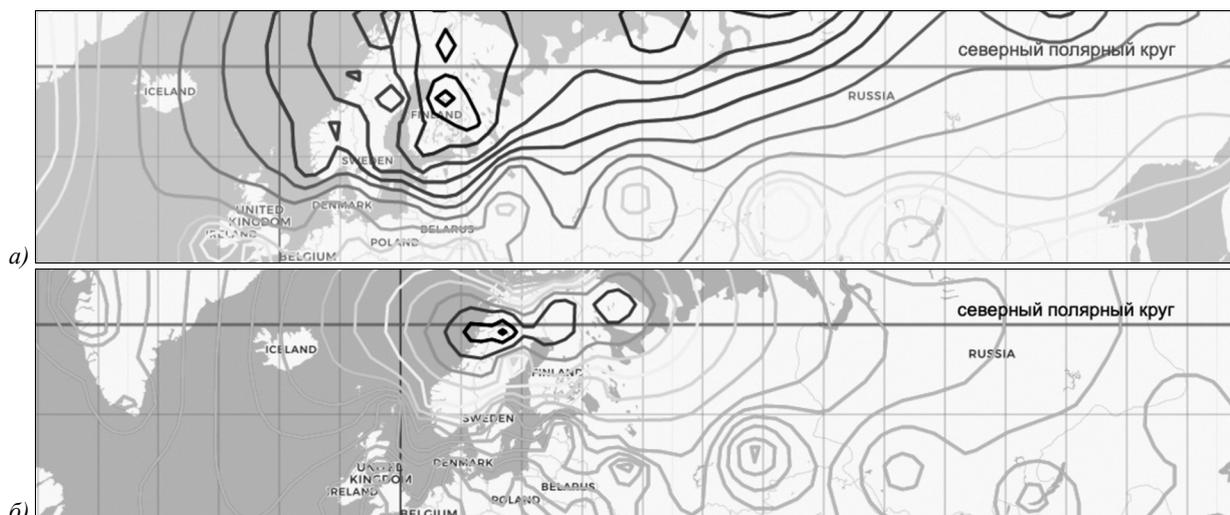


Рис. 5. Моделирование пространственного распределения скорости изменения северной составляющей вектора магнитного поля Земли dN/dt в период магнитной бури 2015-10-07 (<https://geomagnetic.ru>): а) 04:57:05 UT, западное полушарие; б) 20:37 UT, восточное полушарие

Заключение

Задача создания веб-ГИС, предоставляющей специалистам в области техносферной безопасности, промышленной геофизики, экологии и смежных областей знаний эффективный инструмент для аналитического контроля параметров ГМП и его вариаций, на сегодняшний день является практически не решенной. Необходимость создания системы такого рода назрела и возрастает с каждым годом, что объясняется динамикой расширения экономических, стратеги-

ческих и других интересов государств арктического пояса в высокоширотные области Земли.

Архитектура и методы предложенной ГИС в необходимой степени обеспечивают возможность аналитического контроля основных параметров космогенных вариаций ГМП по данным наблюдений магнитных обсерваторий и вариационных станций.

При этом, имея изначально небольшое число источников данных, реализованные методы достаточно достоверно позволяют выявлять вероятные области экстремальных значений вариаций параметров ГМП,

что представляет интерес как при проектировании новых объектов инфраструктуры арктических регионов, так и при эксплуатации уже имеющихся.

Перспективным направлением развития данной ГИС является добавление данных спутниковых наблюдений, прогностических моделей, интерактивных слоев высокоширотных объектов инфраструктуры (железнодорожные сети, ЛЭП, трубопроводы и др.), а также ее интеграция с мировыми и региональными центрами геомагнитных данных.

Благодарности

Работа поддержана грантами РНФ 17-77-20034 и РФФИ № 20-07-00011-а, а также Министерством науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФГБОУ ВО УГАТУ # FEUE-2020-0007 по теме «Теоретические основы моделирования и семантического анализа процессов преобразования вихревых электромагнитных полей в инфокоммуникационных системах».

Литература

1. Селиванов, В.Н. Исследование влияния геомагнитных возмущений на гармонический состав токов в нейтральных автотрансформаторов / В.Н. Селиванов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2012. – Вып. 4. – С. 60-68.
2. Belakhovsky, V. Disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines / V. Belakhovsky [et al.] // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2019. – Vol. 9. – A18. – DOI: 10.1051/swsc/2019015.
3. Гвишиани, А.Д. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе / А.Д. Гвишиани, Р.Ю. Лукьянова // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. Материалы Всероссийской науч. конференции, посвящённой 30-летию ИПНГ РАН. – 2017. – С. 46.
4. Engebretson, M.J. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 1. Survey and statistical analysis / M.J. Engebretson [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124, Issue 9. – P. 7442-7458. – DOI: 10.1029/2019JA026797.
5. Kozyreva, O. Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents / O. Kozyreva, V. Pilipenko, E. Sokolova, Ya. Sakharov, D. Epishkin. – In: Problems of Geocosmos–2018. Springer proceedings in earth and environmental sciences / ed. by T.B. Yanovskaya, A. Kosterov, N.Yu. Bobrov, A.V. Divin, A.K. Saraev, N.V. Zolotova. – Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 297-308. – DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_26.
6. Kozyreva, O. Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents / O. Kozyreva, V. Pilipenko, R. Krasnoperov, L. Baddeley, Ya. Sakharov, M. Dobrovolsky // Annals of Geophysics. – 2020. – Vol. 63, Issue 2. – GM219. – DOI: 10.4401/ag-8198.
7. Kozyreva, O.V. Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015, storm / O.V. Kozyreva, V.A. Pilipenko, V.B. Belakhovsky, Ya.A. Sakharov // Earth, Planetary and Space. – 2018. – Vol. 70. – 157. – DOI: 10.1186/s40623-018-0933-2.
8. Воробьев, А.В. Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, Вып. 6. – С. 963-972. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.
9. Kolios, S. GIS and environmental monitoring. Applications in the marine, atmospheric and geomagnetic fields / S. Kolios, A.V. Vorobev, G.R. Vorobeve, C. Stylios. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017. – 174 p. – ISBN: 978-3-319-53084-0.
10. Gjerloev, J.W. The SuperMAG data processing technique / J.W. Gjerloev // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117. – A09213. – DOI: 10.1029/2012JA017683.
11. Newell, P.T. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power / P.T. Newell, J.W. Gjerloev // Journal of Geophysical Research. – 2011. – Vol. 116. – A12211. – DOI: 10.1029/2011JA016779.
12. Vorobev, A.V. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories / A.V. Vorobev, G.R. Vorobeve // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – Vol. 58. – P. 625-628. – DOI: 10.1134/S0016793218050158.
13. Третьяк, Л.Н. Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие / Л.Н. Третьяк. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.
14. Воробьев, А.В. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов / А.В. Воробьев, В.А. Пилипенко, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов // Солнечно-земная физика. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 48-58. – DOI: 10.12737/szf-51201905.
15. Vorobev, A. Vorobeve G. Properties and type of latitudinal dependence of statistical distribution of geomagnetic field variations / A. Vorobev, G. Vorobeve. – In: Trigger effects in geosystems. Springer proceedings in earth and environmental sciences / ed. by G. Kocharyan, A. Lyakhov. – Cham: Springer, 2019. – P. 197-206. – DOI: 10.1007/978-3-030-31970-0_22.
16. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 535 с.
17. Воробьев, А.В. Индуктивный метод восстановления временных рядов геомагнитных данных / А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева // Труды СПИИРАН. – 2018. – Вып. 2(57). – С. 104-133. – DOI: 10.15622/sp.57.5.
18. Isaaks, E.H. An Introduction to applied geostatistics / E.H. Isaaks, R. Mohan. – Oxford: Oxford University Press, 1989. – 592 p.
19. Vorobev, A.V. Correlation analysis of geomagnetic data synchronously recorded by the INTERMAGNET magnetic laboratories / A.V. Vorobev, G.R. Vorobeve // Geomagnetism and Aeronomy. – 2018. – Vol. 58. – P. 178-184. – DOI: 10.1134/S0016793218020196.
20. Kataoka, R. Extreme geomagnetically induced currents / R. Kataoka, C. Ngwira // Progress in Earth and Planetary Science. – 2016. – Vol. 3. – 23. – DOI: 10.1186/s40645-016-0101-x.
21. Maple, C. Geometric design and space planning using the marching squares and marching cube algorithms / C. Maple // Proceedings of the 2003 International Conference on Geometric Modeling and Graphics. – 2003. – P. 90-95. – DOI: 10.1109/GMAG.2003.1219671.

22. **Vorobev, A.V.** Statistical properties of the geomagnetic field variations and geomagnetically induced currents / A.V. Vorobev, V.A. Pilipenko, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov. – In: Problems of Geocosmos-2018. Springer proceedings in earth and environmental sciences / ed. by T.B. Yanovskaya, A. Kosterov, N.Yu. Bobrov, A.V. Divin, A.K. Saraev, N.V. Zolotova. – Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 39-50. – DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_5.
23. **Успенский, М.И.** Основные понятия и пути влияния геомагнитных штормов на электроэнергетическую систему / М.И. Успенский // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2017. – № 1(129). – С. 72-81.
24. **Lakhina, G.** Research on historical records of geomagnetic storms / G. Lakhina, S. Alex, B. Tsurutani, W. Gonzalez // Proceedings of the International Astronomical Union. – 2004. – P. 3-15. – DOI: 10.1017/S1743921305000074).

Сведения об авторах

Воробьев Андрей Владимирович, 1983 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) по направлению «Электроника и микроэлектроника», кандидат технических наук, доцент, работает доцентом кафедры геоинформационных систем УГАТУ, а также научным сотрудником ФГБУН Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН). Область научных интересов: цифровая обработка геомагнитных данных, геоиндуцированные токи, интеллектуальные системы и технологии, геоинформационные системы. E-mail: geomagnet@list.ru.

Пилипенко Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, работает заведующим лабораторией физики околоземного пространства ФГБУН Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН). Область научных интересов: геомагнитные возмущения, геомагнитные пульсации, геоиндуцированные токи. E-mail: pilipenko_va@mail.ru.

Еникеев Тагир Аделевич, 1999 года рождения, студент факультета информатики и робототехники ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Обучается по направлению «Информационные системы и технологии». Область научных интересов: веб-технологии, геоинформационные системы. E-mail: entagir@gmail.com.

Воробьева Гульнара Равилевна, 1983 года рождения, в 2005 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления», кандидат технических наук, доцент, работает доцентом факультета информатики и робототехники ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Область научных интересов: геоинформационные системы, веб-технологии, системы хранения и обработки информации. E-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com.

ГРНТИ: 83.77.31

Поступила в редакцию 20 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 10 июля 2020 г.

Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations

A.V. Vorobev^{1,2}, V.A. Pilipenko^{2,3}, T.A. Enikeev¹, G.R. Vorobeva¹

¹Ufa State Aviation Technical University, 450008, Ufa, Russia, K.Marks st. 12,

²Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia, Molodezhnaya St. 3, 119296

³The Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia, B.Grazhdanskaya St. 10/1, 123242

Abstract

The paper is concerned with an approach to developing a specialized web-GIS based on a microservice architecture that provides analytical control of the disturbed component of geomagnetic field variations, according to observation data from magnetic observatories and variational stations published on the SuperMAG portal (<http://supermag.jhuapl.edu/>).

A method of spatial interpolation of geomagnetic data implemented in the proposed web-GIS, together with the proposed scheme for ranking and interpreting them, as well as a visualization method in the form of isolines, allows a user to track the structure, observe the dynamics, identify probable regions, duration and time intervals of the occurrence of extreme geomagnetic disturbances.

Keywords: geoinformation system, geomagnetic data, geospatial analysis, geostatistics, geomagnetic disturbances.

Citation: Vorobev AV, Pilipenko VA, Enikeev TA, Vorobeva GR. Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations. *Computer Optics* 2020; 44(5): 782-790. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-707

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 17-77-20034), the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-07-00011-a), and the RF Ministry of Science and Higher Education (government project USATU #FEUE-2020-0007).

References

- [1] Selivanov VN, Barannik MB, Danilin AN, Kolobov VV, Sakharov YaA. Investigation of the influence of geomagnetic disturbances on the harmonic composition of currents in the neutrals of autotransformers [In Russian]. *Proc Kola Science Center RAS* 2012; 4: 60-68.
 - [2] Belakhovsky V, Pilipenko V, Engebretson M, Sakharov Ya, Selivanov V. Disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *J Space Weather Space Clim* 2019;9: A18. DOI: 10.1051/swsc/2019015.
 - [3] Gvishiani AD, Lukyanova RYu. Assessment of the influence of geomagnetic disturbances on the trajectory of directional drilling of deep wells in the Arctic region. The fundamental basis of innovative technologies in the oil and gas industry. *Proceedings of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the 30th anniversary of the IPG RAS* 2017: 46.
 - [4] Engebretson MJ, Pilipenko VA, Ahmed LY, Posch JL, Steinmetz ES, Moldwin MB, Connors MG, Weygand JM, Mann IR, Boteler DH, Russell CT, Vorobev AV. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 1. Survey and statistical analysis. *J Geophys Res Space Phys* 2019; 124(9): 7442-7458. DOI: 10.1029/2019JA026797.
 - [5] Kozyreva O, Pilipenko V, Sokolova E, Sakharov Ya, Epishkin D. Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents. In Book: Yanovskaya TB, Kosterov A, Bobrov NYu, Divin AV, Saraev AK, Zolotova NV, eds. *Problems of Geocosmos–2018*. Springer proceedings in earth and environmental sciences, eds. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020: 297-308. DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_26.
 - [6] Kozyreva O, Pilipenko V, Krasnoperov R, Baddeley L, Sakharov Ya, Dobrovolsky M. Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents. *Ann Geophys* 2019; 63(2): GM219. DOI: 10.4401/ag-8198.
 - [7] Kozyreva OV, Pilipenko VA, Belakhovsky VB, Sakharov YaA. Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015, storm. *Earth Planet Space* 2018; 70: 157. DOI: 10.1186/s40623-018-0933-2.
 - [8] Vorobev AV, Vorobeva GR. Geoinformation system for amplitude-frequency analysis of geomagnetic variations and space weather observation data. *Computer Optics* 2017; 41(6): 963-972. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.
 - [9] Kolios S, Vorobev A, Vorobeva G, Stylios C. GIS and environmental monitoring. Applications in the marine, atmospheric and geomagnetic fields. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG; 2017. ISBN: 978-3-319-53084-0.
 - [10] Gjerloev JW. The SuperMAG data processing technique. *J Geophys Res* 2012; 117: A09213. DOI: 10.1029/2012JA017683.
 - [11] Newell PT, Gjerloev JW. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power. *J Geophys Res* 2011; 116: A12211. DOI: 10.1029/2011JA016779.
 - [12] Vorobev AV, Vorobeva GR. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories. *Geomagn Aeron* 2018; 58: 625-628. DOI: 10.1134/S0016793218050158.
 - [13] Tretyk LN. Observation results processing [In Russian]. – Orenburgh: "OGU" Publisher; 2004.
-

- [14] Vorobev AV, Pilipenko VA, Sakharov YaA, Selivanov VN. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents [In Russian]. *Solar-Terrestrial Physics* 2019; 5(1): 48-58. DOI: 10.12737/szf-51201905.
- [15] Vorobev A, Vorobeve G. Properties and type of latitudinal dependence of statistical distribution of geomagnetic field variations. In Book: Kocharyan G, Lyakhov A, eds. *Trigger effects in geosystems*. Springer proceedings in earth and environmental sciences. Cham: Springer; 2019: 197-206. DOI: 10.1007/978-3-030-31970-0_22.
- [16] Bolshev LN, Smirnov NV. *Tables of mathematical statistics [In Russian]*. Moscow: "Nauka" Publisher, 1983.
- [17] Vorobev AV, Vorobeve GR. Inductive method of geomagnetic data time series recovering. *SPIIRAS Proceedings* 2018; 2(57): 104-133. DOI: 10.15622/sp.57.5.
- [18] Isaaks EH, Mohan R. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford: Oxford University Press; 1989.
- [19] Vorobev AV, Vorobeve GR. Correlation analysis of geomagnetic data synchronously recorded by the INTERMAGNET magnetic laboratories. *Geomagn Aeron* 2018; 58: 178-184. DOI: 10.1134/S0016793218020196.
- [20] Kataoka R, Ngwira C. Extreme geomagnetically induced currents. *Prog Earth Planet Sci* 2016; 3: 23. DOI: 10.1186/s40645-016-0101-x.
- [21] Maple C. Geometric design and space planning using the marching squares and marching cube algorithms. *Proc 2003 Int Conf on Geometric Modeling and Graphics 2003*: 90-95. DOI: 10.1109/GMAG.2003.1219671.
- [22] Vorobev AV, Pilipenko VA, Sakharov YaA, Selivanov VN. Statistical properties of the geomagnetic field variations and geomagnetically induced currents. In Book: Yanovskaya TB, Kosterov A, Bobrov NYu, Divin AV, Saraev AK, Zolotova NV, eds. *Problems of Geocosmos-2018*. Springer proceedings in earth and environmental sciences, eds. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020: 39-50. DOI: 10.1007/978-3-030-21788-4_5.
- [23] Uspensky MI. Basic concepts and ways of influence of geomagnetic storms on the electric power system [In Russian]. *Bulletin of the Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences* 2017; 1(129): 72-81.
- [24] Lakhina G, Alex S, Tsurutani B, Gonzalez W. Research on historical records of geomagnetic storms. *Proc Int Astron Union* 2004: 3-15. DOI: 10.1017/S1743921305000074.

Authors' information

Andrei Vladimirovich Vorobev (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2006, majoring in Electronic and Microelectronics, PhD. Currently he works as the associate professor at Geoinformation Systems department in Ufa State Aviation Technical University, and as researcher in Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia. Research interests are digital geomagnetic data processing, geomagnetically induced currents, intelligent systems and technologies, geoinformation systems. E-mail: geomagnet@list.ru.

Vyacheslav Anatolyevich Pilipenko, Dr.Tech.Sc., works as head of the Laboratory of Near-Earth Space Physics, The Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia. Research interests are solar-terrestrial physics, geomagnetic disturbances, geomagnetic pulsations, geomagnetically induced currents. E-mail: pilipenko_va@mail.ru.

Tagir Adelevich Enikeev, born in 1999, a student of Computer Science and Robotics department in Ufa State Aviation Technical University. He is studying in speciality "Information Systems and Technologies". Research interests are web technologies, geographic information systems. E-mail: entagir@gmail.com.ru.

Gulnara Ravilevna Vorobeve (b. 1983) graduated from Ufa State Aviation Technical University in 2005, majoring in Automated Systems of Data Processing and Control, PhD. Currently she works as the associate professor at Computer Science and Robotics department in Ufa State Aviation Technical University. Research interests are geoinformation and web technologies, systems of information storing and processing. E-mail: gulnara.vorobeve@gmail.com.

Received April 20, 2020. The final version – July 10, 2020.