

УДК 550.38

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМАГНЕТИЗМА, РЕШАЕМЫЕ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.А. Соловьев

Геофизический центр РАН, 119296, Москва, ул. Молодёжная, 3, Россия

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, стр. 1, Россия

Непрерывный рост геомагнитных наблюдений требует адекватных методов их обработки и анализа. С другой стороны, многие исследования в области геомагнетизма требуют точных и надежных измерений, проводимых на Земле и в космосе. Математические методы геоинформатики способны обеспечить решение этих проблем. В статье представлены успехи в области интеллектуального анализа геомагнитных данных, которые непрерывно регистрируются магнитными обсерваториями и низкоорбитальными спутниками, демонстрируются результаты в области изучения быстрых вариаций главного магнитного поля, связанных с глубинными процессами Земли, а также в области исследования околоземной электромагнитной динамики. Показана прикладная ценность полученных результатов.

Главное магнитное поле, электромагнитные вариации, магнитные обсерватории, спутниковые наблюдения, вековой ход, вековое ускорение, продольные токи, моделирование, дискретный математический анализ

SOME CHALLENGES OF GEOMAGNETISM ADDRESSED WITH THE USE OF GROUND AND SATELLITE OBSERVATIONS

A.A. Soloviev

The continuous growth of geomagnetic observations requires adequate methods for their processing and analysis. On the other hand, many studies in the field of geomagnetism require accurate and reliable measurements from both ground and space. Mathematical methods of geoinformatics can provide a solution to these problems. The article describes the progress made in the field of intellectual analysis of geomagnetic data continuously recorded by magnetic observatories and low-orbit satellites, demonstrates the results in the study of rapid variations of the Earth's core magnetic field associated with the processes in the Earth's deep interior, and presents the investigation of near-Earth electromagnetic dynamics. The applied value of the obtained results is also shown.

Core magnetic field, electromagnetic variations, magnetic observatories, satellite observations, secular variation, secular acceleration, field-aligned currents, modeling, discrete mathematical analysis

ВВЕДЕНИЕ

Изучение земного магнетизма является старейшим разделом геофизики. Основные вехи в понимании этого феномена происходили отнюдь не регулярно, однако большая их часть была так или иначе связана с развитием измерительной аппаратуры. Это легко объясняется неосвязаемостью магнитного поля, проявления которого можно наблюдать лишь по косвенным показаниям. Так, эпоха бурного развития судоходства, начавшаяся в XIII в., дала мощный импульс усовершенствованию конструкции компаса. Вообще, открытие и изучение пространственно-временной изменчивости магнитного склонения диктовались, прежде всего, прагматическими целями морской навигации. Благодаря систематическим наблюдениям магнитного склонения в ходе морских экспедиций, появились первые мировые и региональные карты этой фундаментальной характеристики магнитного поля Земли (МПЗ). Первые теоретические обобщения наблюдений магнитного поля относятся к XVII в., когда впервые были начаты систематические наблюдения угловых компонент МПЗ. К началу XIX в. стационарные геомагнитные наблюдения стремительно разворачивались по всему миру, формируя глобальную сеть магнитных обсерваторий, что послужило очередным импульсом в познании природы земного магнетизма и формированию его базовой теории. С тех пор основные принципы функционирования магнитных обсерваторий остаются неизменными, а обсерваторские наблюдения магнитного поля и по сей день являются незаменимым источником информации о глубинных процессах и электромагнитном окружении Земли.

XX в. был ознаменован началом космической эры в первую очередь в интересах изучения Земли и околоземного пространства. Научная программа первых спутниковых миссий неизменно включала в

себя регистрацию магнитных полей Земли, ионосферы и магнитосферы. Так, 15 мая 1958 г. был запущен первый магнитометрический спутник «Спутник-3» [Skuridin, 1975]. В 1967 г. эталонная международная модель геомагнитного поля IGRF (International Geomagnetic Reference Field) была впервые обновлена с привлечением скалярных спутниковых данных благодаря запуску спутников серии POGO (полярно-орбитальные геофизические обсерватории) [Cain et al., 1967; Jackson, Vette, 1975]. Эта модель обновляется каждые 5 лет и по сей день служит основой для изучения главного МПЗ [Alken et al., 2021].

С появлением векторных спутниковых наблюдений МПЗ в конце 1990-х годов была открыта возможность изучения быстрых вариаций главного МПЗ, характеризующихся временными масштабами 1—10 лет. Сейчас они являются объектом пристального внимания исследователей в области геомагнетизма по всему миру. Это обусловлено не только взрывным ростом высокоточных данных об эволюции МПЗ, но и наращиванием вычислительных мощностей и успехами в области теоретических исследований геодинамо. Так, например, в 2019 г. была построена численная модель, воспроизводящая все известные вариации МПЗ на границе ядро—мантия за последние 25 лет [Aubert, Finlay, 2019]. Но, несмотря на указанный прогресс, природа таких вариаций, включающих всплески векового ускорения и джерки, по-прежнему остается не до конца изученной. Любые новые открытия в этой области вносят весомый вклад в понимание их природы. Несомненно, и на геологических масштабах времени эволюция главного МПЗ поднимает множество нерешенных вопросов [Reshetnyak, 2020].

Рост наземных сетей и спутниковых систем наблюдений МПЗ, а также повышение качества регистрируемых данных дают возможность фиксировать все новые эффекты космической погоды магнитосферного и ионосферного происхождения, что требует их физического обоснования. Помимо фундаментальной потребности, всестороннее изучение электромагнитных процессов в околоземном пространстве становится все более актуальным в связи со стремительным развитием высокотехнологичной инфраструктуры, уязвимой воздействию космической погоды. В особенности это касается устойчивого функционирования нефтегазовых, электроэнергетических, транспортных, навигационных и радиолокационных систем в высоких широтах, в частности, в широко осваиваемой Арктической зоне РФ, где негативные проявления космической погоды наиболее интенсивны. В этой связи помимо усовершенствования методов математического моделирования для обобщения накапливаемой информации не менее важным становится оперативное детектирование и изучение отдельных геомагнитных сигналов, приводящих, например, к всплескам геомагнитно-индуцированных токов в земной коре. Все это требует развития адекватных методов обработки геофизической информации для распознавания сигналов различной природы в потоках непрерывно поступающих данных.

В настоящей работе представлен обзор результатов, полученных научным коллективом лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) за последние 10 лет [Гвишиани и др., 2019; Gvishiani, Soloviev, 2020], в области изучения динамики магнитного поля Земли в ее недрах и околоземном пространстве по данным геомагнитных наблюдений наземного и спутникового базирования. Отдельное внимание уделено прикладным задачам, связанным с работоспособностью высокотехнологических систем, в которых корректный учет геомагнитной информации носит критический характер.

НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ КАК ОСНОВА СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОМАГНЕТИЗМА

Наиболее детальные данные о динамике МПЗ, вызванной как внешними, так и внутренними источниками, обеспечиваются наблюдениями полного вектора МПЗ низкоорбитальными спутниками с высоким наклонением орбиты [Olsen et al., 2010]. Как правило, высота орбиты таких спутников варьируется от 200 до 800 км. Основная ценность таких данных состоит в полном пространственном покрытии измерениями околоземного пространства за короткий интервал времени (рис. 1). Первые векторные измерения геомагнитного поля появились благодаря запуску спутниковой миссии Magsat. В результате были получены ценные данные за шестимесячный период между 1979 и 1980 гг., которые позволили впервые построить надежную модель главного МПЗ [Mandea, 2006]. В течение последующих двадцати лет спутниковые измерения такого уровня не проводились, и только с конца 1990-х годов была начата долгосрочная программа изучения МПЗ из космоса, которая длится до сих пор. Так, в 1999 г. консорциумом научных организаций Дании был разработан и выведен на орбиту спутник Ørsted [Neubert et al., 2001]. Позже немецкими разработчиками был запущен спутник CHAMP, который обеспечивал высокоточную регистрацию геомагнитных данных в 2000—2010 гг. [Reigber et al., 2002]. В период 2000—2013 гг. благодаря международной кооперации функционировал многоцелевой спутник SAC-C, в частности, измеряющий полный вектор МПЗ [Colomb et al., 2004]. Американские спутники серии DMSP 5D-3 регулярно выводятся на орбиту с 2000 г. и обеспечивают регистрацию трех компонент магнитного поля [Alken et al., 2014]. Наконец, в 2013 г. российским ракетоносителем «Рокот» были выведены в околоземное пространство три идентичных спутника Swarm Европейского космического агентства

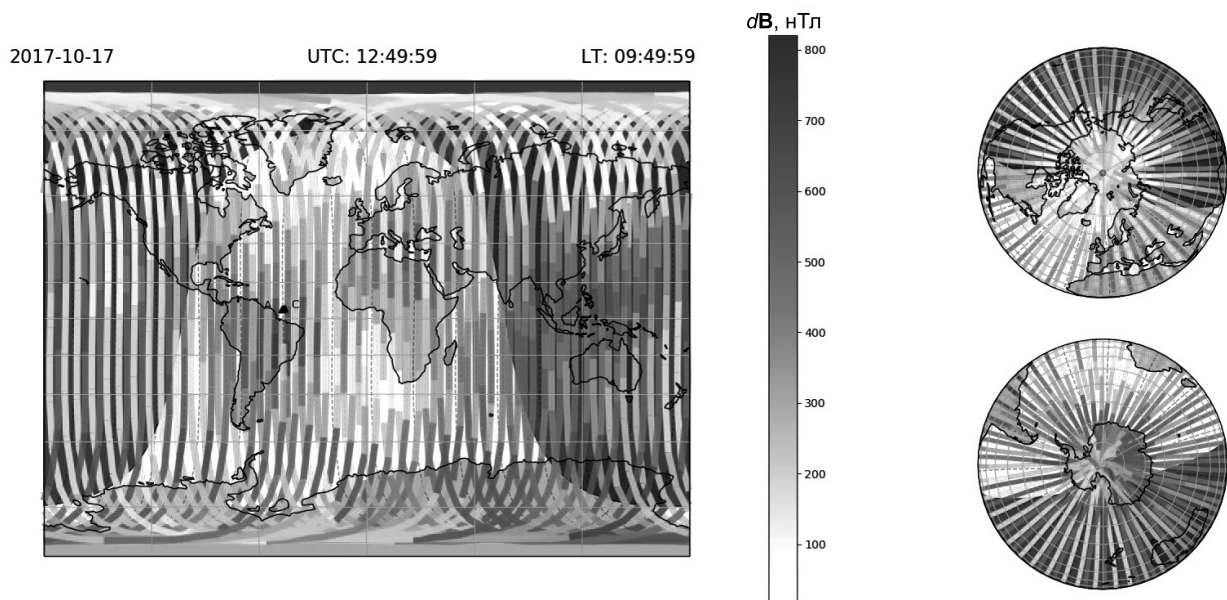


Рис. 1. Пролеты одного из спутников Swarm (Swarm-A) за 2,5 сут 15—17 октября 2017 г. в проекциях Миллера (слева), северно-полярной и южно-полярной (справа).

Цветом показан модуль градиента поля, тенью отмечен терминатор (<http://geomag.gcras.ru>). Здесь и далее: UT — всемирное время, LT — локальное время.

[Friis-Christensen et al., 2006]. На сегодняшний день спутники Swarm являются основным источником информации о динамике МПЗ космического базирования. Существуют и другие низкоорбитальные спутники, регистрирующие параметры МПЗ, однако их данные в открытом доступе отсутствуют.

Появление высокоточных спутниковых измерений полного вектора МПЗ позволило строить надежные глобальные аналитические модели главного МПЗ высокой детализации и высокого временного разрешения. В свою очередь, такие модели впервые открыли возможность изучения так называемых быстрых вариаций главного МПЗ [Lesur et al., 2022]. Так, они позволяют локализовать и изучать динамические процессы на границе ядро—мантия, которые порождают быстрые вариации МПЗ, наблюдаемые на поверхности Земли и в околоземном пространстве (рис. 2). Такие исследования позволяют глубже понять механизмы генерации МПЗ в жидком ядре и его эволюцию.

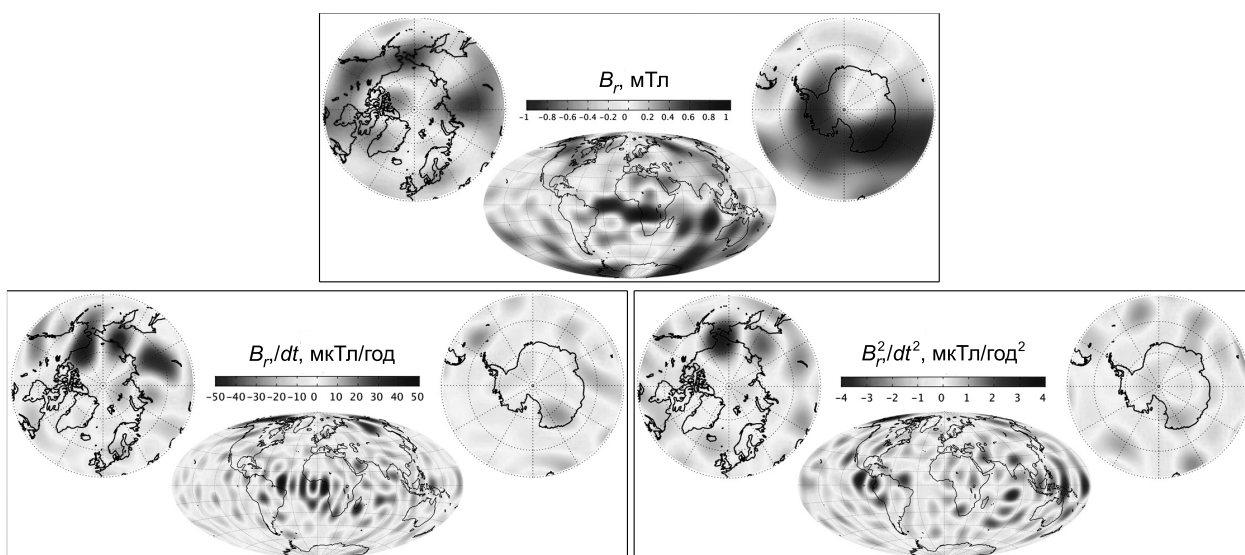
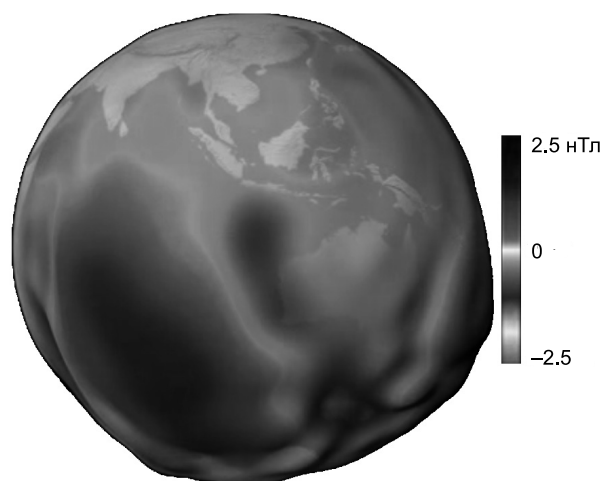


Рис. 2. Картографирование МПЗ на границе ядро—мантия согласно модели CHAOS-7 на эпоху 2019.0 [Finlay et al., 2020]:

радиальная компонента (сверху), ее первая (слева) и вторая (справа) производные по времени.

Рис. 3. Визуализация океанического магнетизма по данным спутников Swarm (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_tracks_elusive_ocean_magnetism).



Данные созвездия спутников Swarm дают возможность улавливать слабый магнитный сигнал, индуцируемый в океане в результате течения соленой воды через МПЗ. Несмотря на достаточно большую высоту полета спутников Swarm, регистрируемые наблюдения позволяют подробно исследовать поистине крошечное магнитное поле приливов от поверхности океана до морского дна, которое варьируется в пределах нескольких нТл (рис. 3). С недавних пор в ГЦ РАН начались комплексные исследования циркуляции Мирового океана и многомасштабный анализ его пространственно-временной динамики с использованием всего арсенала существующих спутниковых наблюдений: электромагнитных (для изучения крупномасштабной динамики), гравиметрических (для среднемасштабной динамики) и альтиметрических (для мелкомасштабной динамики).

Несомненной ценностью низкоорбитальных спутниковых наблюдений МПЗ является возможность изучения огромного спектра электромагнитных процессов в околоземном пространстве, генерируемых в ходе взаимодействия магнитосферы и ионосферы. Изучение масштабных проявлений космической погоды (полярные электроджеты, продольные токи, сезонные вариации состояния ионосферы и др.), как правило, базируется на использовании статистических и численных (рис. 4) моделей, построенных с помощью соответствующих спутниковых данных [Lukianova, Christiansen, 2006; Lukianova, Vougoutdinov, 2018]. Вместе с тем исходные данные также крайне полезны для изучения событий, локализованных по пространству и времени. Помимо фундаментальной значимости получаемых данных, диагностика околоземного пространства, по данным магнитных наблюдений, имеет колоссальное прикладное значение. Существует большое количество примеров пагубного воздействия космической погоды на функционирование высокотехнологических систем. К их числу следует отнести недавнее уничтожение магнитной бурей около 40 спутников Starlink компании SpaceX, которое произошло 3 февраля 2022 г. [Malik, 2022]. Это событие как раз пришлось на начальную фазу роста 25-го цикла солнечной активности и было вызвано нагревом и расширением атмосферы вследствие увеличения солнечной активности, что, в свою очередь, приводит к торможению спутников.

Несмотря на высокое пространственно-временное разрешение, спутниковые данные обладают существенным и неизбежным недостатком, связанным с короткой продолжительностью низкоорбитальных спутниковых миссий — характерный срок их активного существования составляет порядка 10 лет. Кроме того, в ряде задач существенным является анализ вариаций магнитного поля в фиксированной

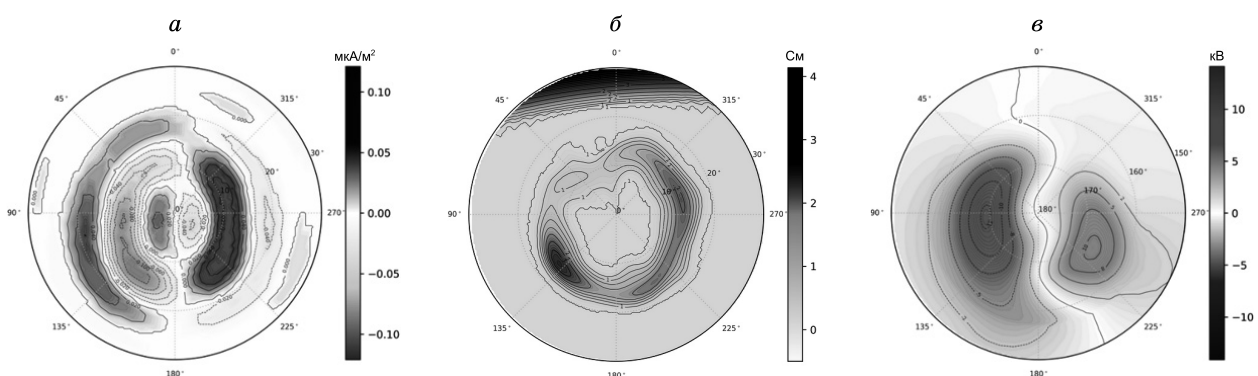


Рис. 4. Результаты численного моделирования электромагнитных параметров полярной ионосферы [Lukianova, Christiansen, 2006] с использованием веб-сервиса ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» (<http://geomag.gcras.ru>):

плотность продольных токов (а), ионосферная проводимость (б), электростатический потенциал (в). Результаты получены для заданных параметров межпланетного магнитного поля, уровней геомагнитной и солнечной активностей, дня года и времени для Северного полушария в координатах магнитное локальное время—магнитная коширота.

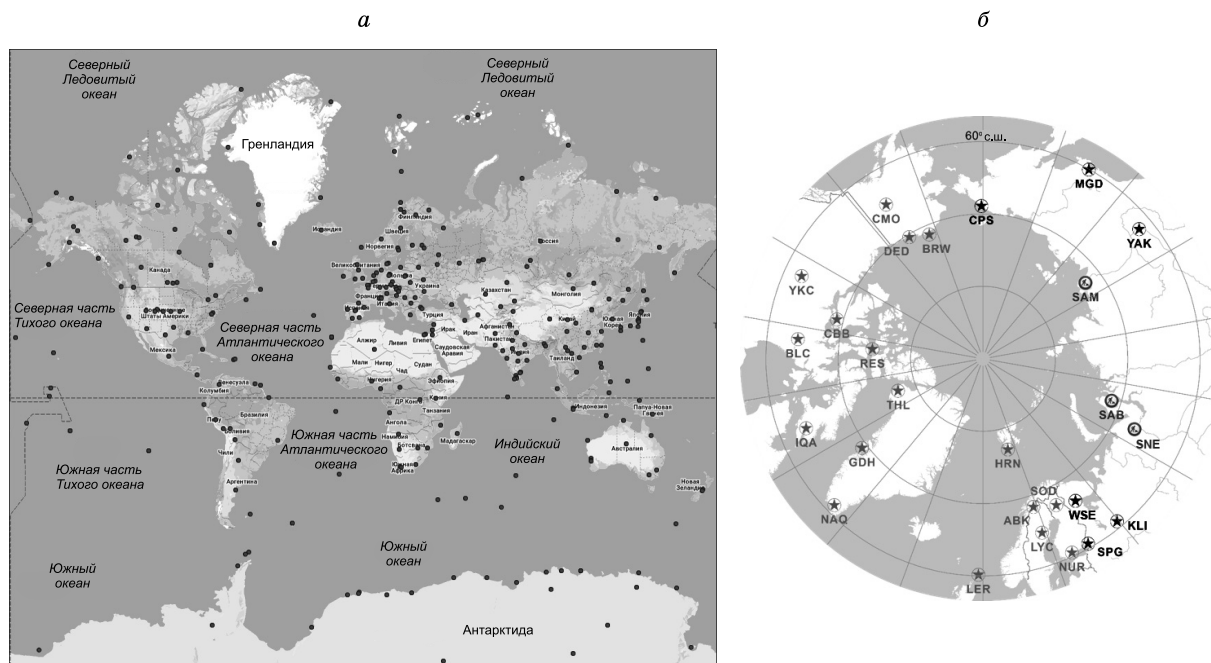


Рис. 5. Магнитные обсерватории, действующие в 1883—2022 гг.,

данные которых доступны в цифровом виде (<http://wdc.bgs.ac.uk/>) (a); актуальная карта высокоширотных обсерваторий на 2022 г. (серыми звездами помечены зарубежные обсерватории сети ИНТЕРМАГНЕТ, черными звездами — российские действующие обсерватории, остальными знаками — строящиеся обсерватории) (б).

точке пространства для оценки его региональной изменчивости. Эти недостатки восполняют данные магнитовариационных станций и магнитных обсерваторий. Последние, как и указанные выше спутники, обеспечивают высокоточные наблюдения полных значений компонент вектора МПЗ и представляют собой высокотехнологичную научную инфраструктуру. Неотъемлемым преимуществом обсерваторских данных является длительность регистрируемых рядов наблюдений, составляющая десятки и сотни лет, а недостатком — крайне неравномерное географическое покрытие Земли (рис. 5, a). Напомним, что длительные и непрерывные измерения полного вектора МПЗ являются основным источником информации о динамике главного МПЗ; естественно, эти же данные активно используются при изучении внешних магнитных полей и индуцированных ими теллурических токов [Khokhlov et al., 2019].

Как видно из рис. 5, б, в Арктической зоне РФ (АЗРФ), развитию которой сейчас уделяется особое внимание («Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», утвержденная Указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645), наблюдается существенный недостаток пунктов геомагнитных наблюдений обсерваторского класса [Пилипенко и др., 2019]. Как будет показано далее, высокоширотные измерения МПЗ крайне востребованы как в фундаментальных исследованиях, так и в промышленности, связанной в основном с нефтегазовой, электроэнергетической и транспортной отраслями. Силами ГЦ РАН ведутся активные работы по развитию системы обсерваторских наблюдений в Российской Арктике (рис. 6). В ее западной части, на побережье Белого моря, на базе Биологической станции им. Н.А.Перцова МГУ уже функционирует обсерватория (IAGA-код WSE) [Гвишиани и др., 2018; Soloviev et al., 2019a]. В ЯНАО продолжаются работы по развертыванию обсерваторий на базе строящейся силами МФТИ Международной арктической станции (МАС) «Снежинка» [Журавель, 2022] и в пос. Сабетта на п-ове Ямал совместно с нефтесервисной компанией «Шлюмбергер» в интересах газодобывающей отрасли (IAGA-коды SNE и SAB соответственно). Совместно с ИНГГ СО РАН ведется строительство магнитной обсерватории на о. Самойловский в дельте р. Лена (Республика Саха) [Гвишиани и др., 2018]. Развитие этой обсерватории (IAGA-код SAM) имеет особое значение и актуальность в связи с сохраняющимся движением северного магнитного полюса в сторону Новосибирских островов в море Лаптевых. Вполне вероятно, что в скором времени эта обсерватория будет ближайшей к нему, что даст возможность изучения динамики МПЗ в непосредственной близости от полюса. Наконец, в самой восточной части АЗРФ силами ИКИР ДВО РАН уже несколько лет обеспечивается высококачественная работа обсерватории Мыс Шмидта (IAGA-код CPS) [Khomutov, 2018].

Эффективность и оперативность исследований динамики магнитных полей в недрах Земли и околоземном пространстве напрямую зависит от доступности исходных данных наблюдений и производных продуктов. К сожалению, часть необходимых данных по-прежнему недоступна в полном объеме или становится доступной с большой задержкой по времени. Геофизический центр РАН обеспечивает функционирование Центра коллективного пользования (ЦКП) «Аналитический центр геомагнитных данных» (<https://ckp.gcras.ru/>), куда поступают данные магнитных обсерваторий, расположенных на тер-

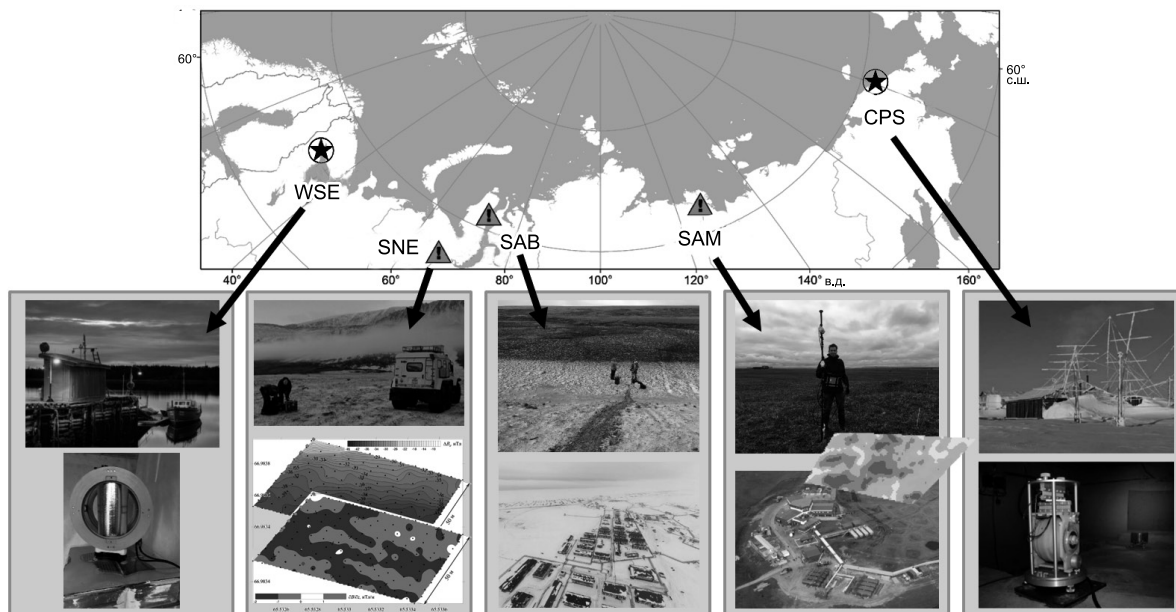


Рис. 6. Карта новых магнитных обсерваторий в АЗРФ на Белом море (WSE), на базе МАС «Снежинка» (SNE), в пос. Сабетте (SAB), на о. Самойловский (SAM) и на мысе Шмидта (CPS) и иллюстрации основных этапов их развертывания.

Звезды — действующие обсерватории, треугольники — строящиеся силами ГЦ РАН.

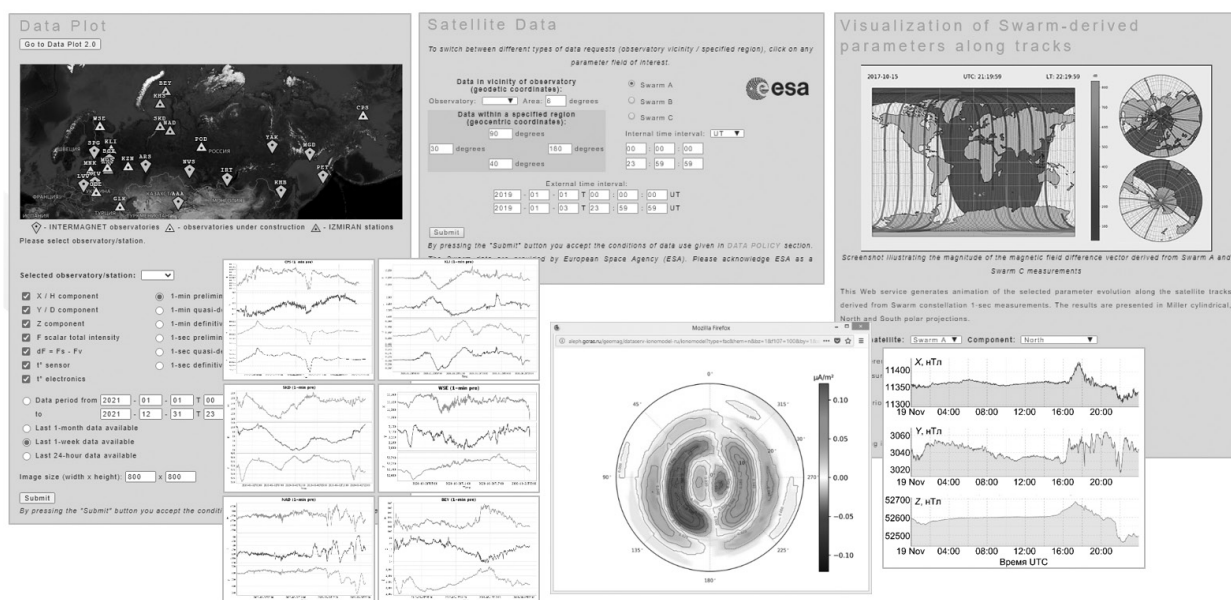


Рис. 7. Скриншот онлайн-сервисов ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» на базе АПК МАГНУС (<http://geomag.gcras.ru/>):

доступ к данным магнитных обсерваторий РФ и ближнего зарубежья в цифровом и графическом виде, доступ к спутниковым наблюдениям МПЗ Swarm и их визуализация, интерактивная работа с моделью полярной ионосферы.

ритории РФ и ближнего зарубежья [Гвишиани и др., 2018]. Его аналитические функции во многом обеспечиваются функционалом аппаратно-программного комплекса (АПК) МАГНУС (Мониторинг и Анализ Геомагнитных аНомалий в Унифицированной Среде) [Gvishiani et al., 2016; Soloviev et al., 2016]. Работа ЦКП построена на принципе открытости как исходных геомагнитных данных, поступающих в центр, так и производных продуктов, полученных на их основе. На рисунке 7 приведены примеры онлайн-доступа к исходным данным и сервисам АПК МАГНУС.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ ВАРИАЦИЙ ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Как отмечалось выше, впервые изучение тонкой структуры геомагнитных вариаций, вызванных процессами в жидком ядре, стало возможным лишь в конце 1990-х годов благодаря систематической регистрации полного вектора МПЗ с высоким пространственным разрешением спутниковыми системами. В частности, за период с начала 2000-х годов были обнаружены сигналы на временных масштабах около 3—6 лет, представляющие собой так называемые всплески векового ускорения (ВУ), т. е. вторую производную поля по времени $d^2\mathbf{B}/dt^2$, на границе ядро—мантия. Кроме того, за период 2002—2012 гг. были обнаружены всплески ВУ на границе ядро—мантия в секторах Южной Атлантики и Индийского океана чередующейся полярности с периодичностью около 3 лет (рис. 8). Было высказано предположение об их связи со стоячей волной с периодом около 6 лет [Chulliat, Maus, 2014], разложение которой на разнонаправленно распространяющиеся волны имеет свойства магнитных волн Россби [Chulliat et al., 2015].

Нами была поставлена задача создания метода детектирования всплесков ВУ исключительно по данным магнитных обсерваторий для возможности их изучения за периоды, когда спутниковые наблюдения были недоступны. Вообще, задача разделения сигналов МПЗ разной природы по геомагнитным наблюдениям является классической. Особо трудоемким считается выделение сигнала внутреннего поля из обсерваторских данных, поскольку исходные наблюдения сильно отягощены шумами, суточными, сезонными и спорадическими возмущениями МПЗ внешней природы (рис. 9). Однако задача успешно была решена благодаря эффективному внедрению принципов дискретного математического анализа [Гвишиани и др., 2010; Agayan et al., 2018; Соловьев, 2018] и нечеткой логики в созданный алгоритм выделения сигнала главного МПЗ [Soloviev et al., 2017].

На базе указанного алгоритма был разработан метод распознавания всплесков ВУ по обсерваторским данным. Он был применен ко всей совокупности данных, доступных за период 1991—2015 гг. (рис. 10). Его эффективность была подтверждена благодаря успешному распознаванию известных всплесков ВУ за 2006, 2009 и 2012 гг., ранее определенных с использованием высокоточных моделей. Кроме того, нами были впервые обнаружены ранее неизвестные всплески ВУ, в том числе до начала высокоточных спутниковых наблюдений — 1996, 1999, 2002 и 2014 гг. (рис. 11). При этом все распознанные всплески ВУ за рассматриваемый период имеют чередующуюся полярность. Данный результат крайне важен для понимания стоящих за ними процессов в жидком ядре, поскольку подтверждает трехлетнюю периодичность всплесков ВУ за более длительный интервал, чем рассматривался ранее. Кроме того, предложенный метод позволяет исследовать всплески ВУ за исторические эпохи наблюдений МПЗ, когда спутниковые данные были недоступны.

Всплески ВУ на границе ядро—мантия приводят к так называемым геомагнитным джеркам, фиксируемым на поверхности Земли как достаточно резкая смена знака тренда векового хода (ВХ) главного МПЗ, т. е. его первой производной по времени dB/dt [Mandea et al., 2010]. При этом наблюдения показывают, что джерки по времени имеют место между двумя соседними всплесками ВУ [Soloviev et al., 2017; Lesur et al., 2022]. Традиционно джерки определяются вручную или полуавтоматическими методами как события на стыке линейно аппроксимированных фрагментов ВХ (рис. 12).

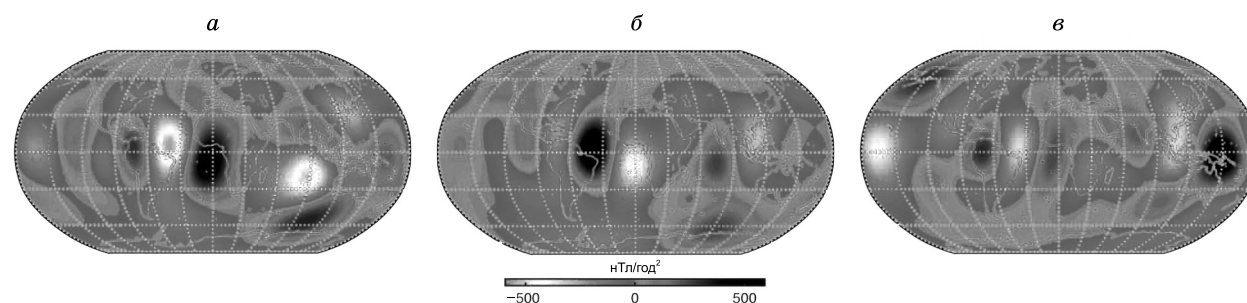


Рис. 8. ВУ радиальной компоненты МПЗ на границе ядро—мантия согласно модели CHAOS-5 [Finlay et al., 2015], построенной по спутниковым данным, за 2006 (а), 2009 (б) и 2012 (в) гг. [Chulliat et al., 2015].

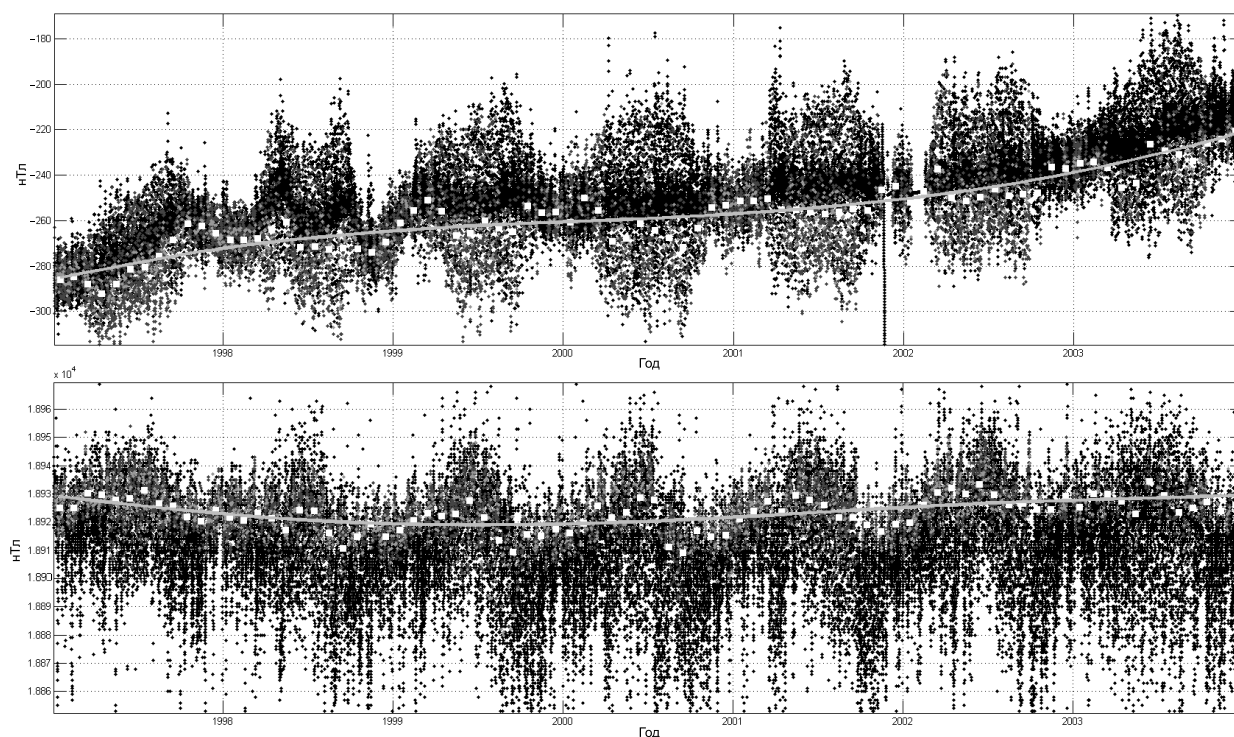


Рис. 9. Пример данных магнитных обсерваторий ABG (Y-компонента, сверху) и BEL (X-компонента, снизу) за 1997—2004 гг. и результаты автоматизированной классификации сигналов МПЗ разной природы:

черным показаны исходные среднечасовые значения, белыми квадратами — сезонная вариация внешнего поля (среднемесячные значения), светло-серой кривой — сигнал главного МПЗ [Soloviev et al., 2017].

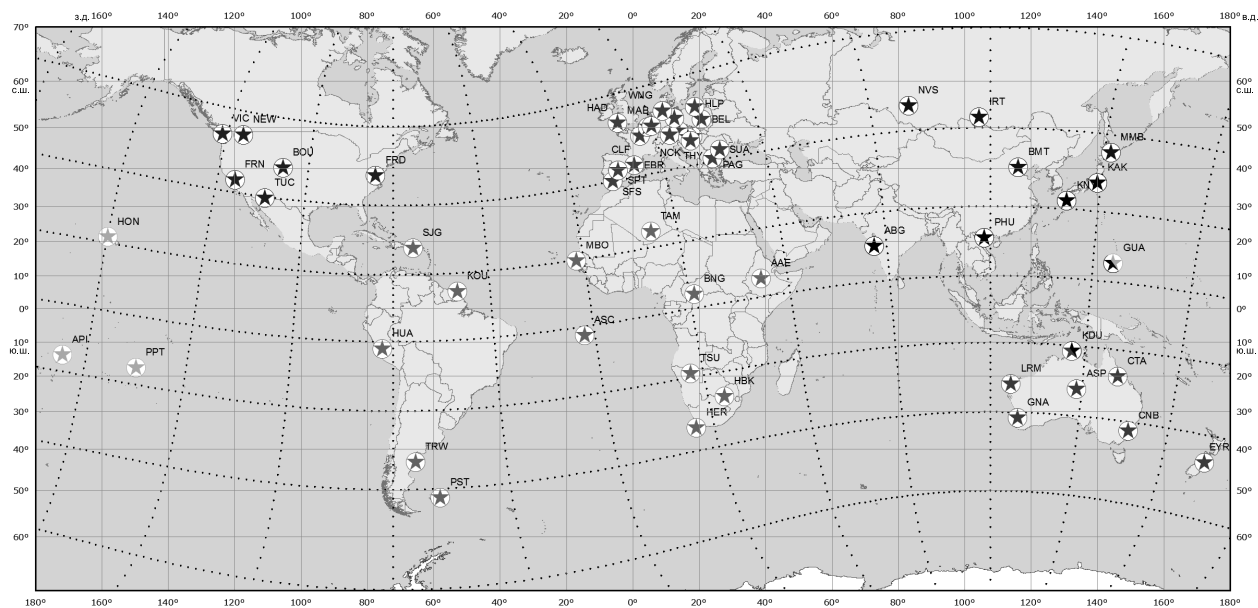


Рис. 10. Карта обсерваторий, данные которых использовались для распознавания всплесков ВУ за период 1991—2015 гг.

Разным цветом обозначена региональная принадлежность обсерваторий (Тихоокеанский, Североамериканский, Атлантический, Европейский, Североазиатский, Южноазиатский и Австралийский регионы).

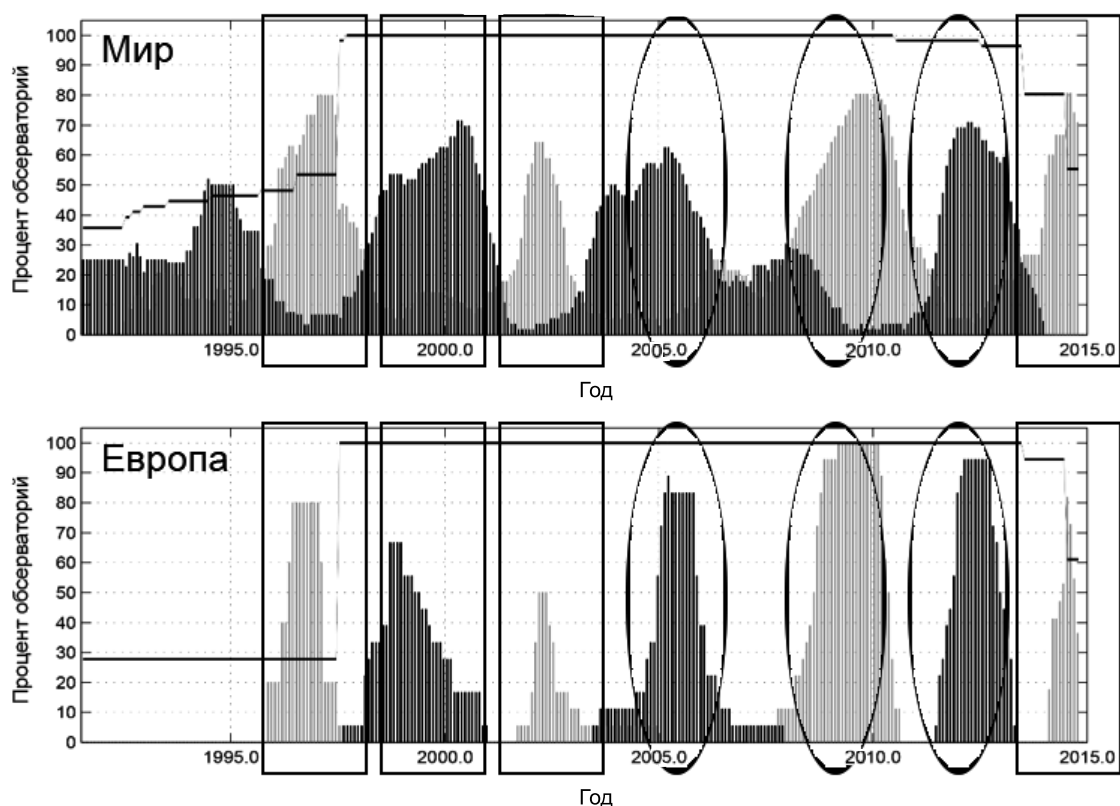
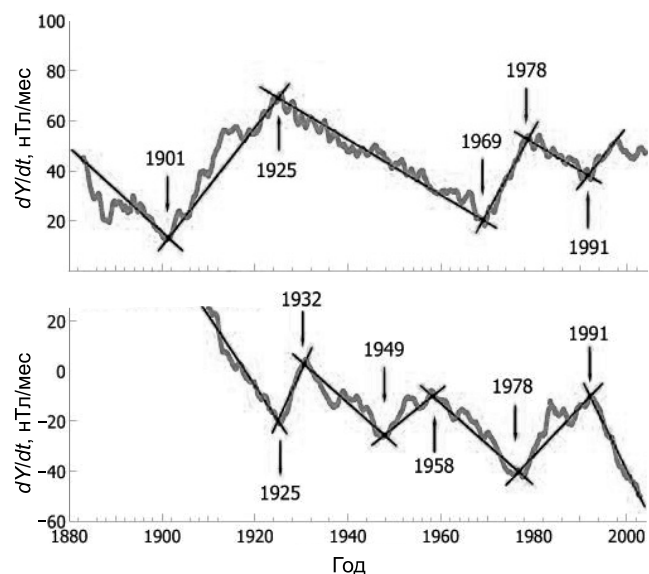


Рис. 11. Зависящая от времени характеристическая функция, отражающая процент рассматриваемых обсерваторий, для которых по X-компоненте ВУ превышает заданный порог по модулю за месяц.

Верхний график построен по всему множеству обсерваторий с порогом ± 2 нТл/год², нижний — по данным только европейских обсерваторий с порогом ± 3 нТл/год²; светло-серый цвет соответствует отрицательной полярности ВУ, темно-серый — положительной. Овалами выделены периоды ранее обнаруженных всплесков ВУ 2006, 2009 и 2012 гг., прямоугольниками — периоды вновь обнаруженных всплесков ВУ 1996, 1999, 2002 и 2014 гг. [Soloviev et al., 2017].

Основная сложность полностью автоматического детектирования джерков связана с разной степенью зашумленности исходных данных и различной амплитудой джерков. Зачастую джерк на данных одной обсерватории может иметь амплитуду, сравнимую с шумовой компонентой ВХ на другой. Нами



был предложен метод многомасштабного детектирования геомагнитных джерков в зашумленных обсерваторских данных. Метод основан на математической конструкции регрессионных производных R' , вычисляемых по дискретным зашумленным рядам, которые могут содержать пропуски [Агаян и др., 2019]. Операция R' тесно связана со стохастическими трендами: области положительного (отрицательного) знакопостоянства R' соответствуют возрастающим (убывающим) трендам u , а границы между ними — экстремумам для u (рис. 13).

Классическая математика на языке «эпсилон-дельта» локальна и она не может дать ответ

Рис. 12. Определение джерков по данным ВХ Y-компоненты обсерваторий CLF (сверху) и TUC (снизу) (<http://ingv.it>).

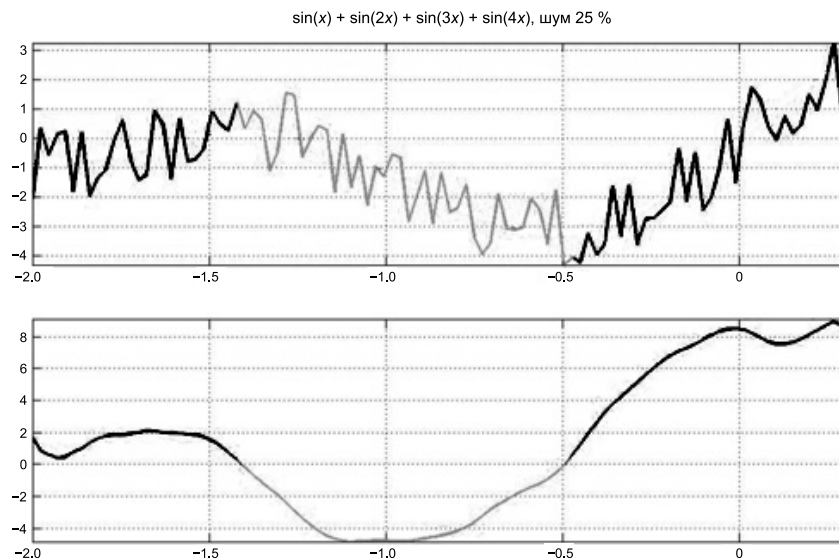


Рис. 13. Пример вычисления регрессионной производной (снизу) по синтетическим данным с добавлением шума (сверху).

Черным цветом на графике обозначены положительные значения производной, соответствующие зонам возрастания исходной функции, серым — зоны ее убывания (отрицательные значения производной).

на вопрос, какого ранга тот или иной экстремум? Наш подход дает разномасштабный ответ относительно поисков экстремумов за счет параметра p , отвечающего за масштаб обзора. Такой иерархический анализ трендов проиллюстрирован на рис. 14.

Очевидным применением предложенного метода явилось определение джерков по зашумленным обсерваторским данным ВХ. Эмпирическим путем был определен диапазон значений p , при котором его нижняя граница обеспечивает попадание большинства известных джерков, а верхняя обеспечивает минимальное количество ложных срабатываний (шума). На рисунке 15 его границы обозначены горизонтальными белыми линиями на нижней диаграмме. Как отмечалось выше, по времени джерки ожидаемы между соседними всплесками ВУ (помечены вертикальными линиями на рис. 15). И действительно, в каждой из очерченных областей на нижней диаграмме наблюдается смена тренда. Обработка большого множества обсерваторий позволяет накапливать статистику по распознанным интервалам, что, в свою очередь, позволяет делать вывод о достоверном детектировании того или иного джерка.

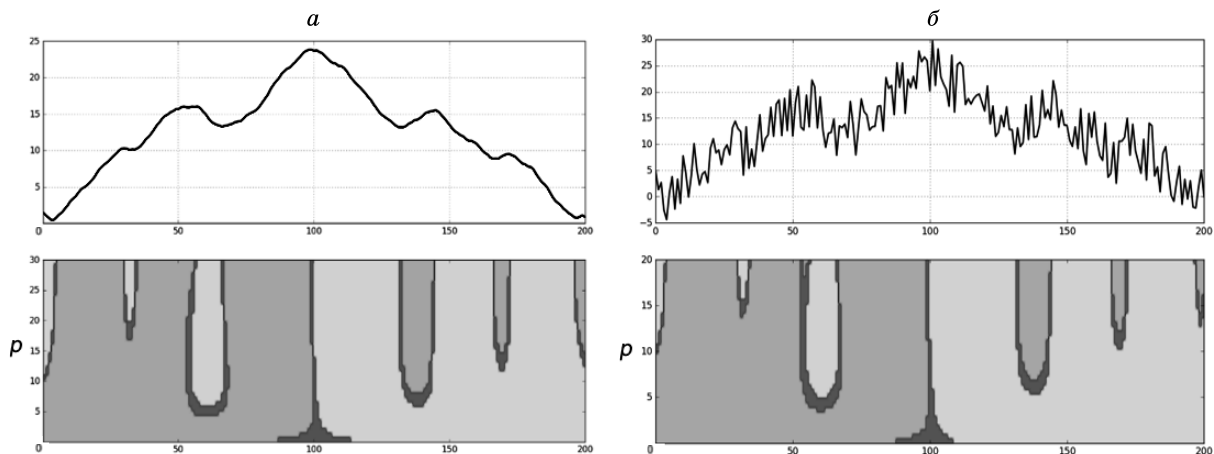


Рис. 14. Результат разномасштабного определения трендов в зависимости от параметра обзора p для гладкой функции (а) и зашумленного ряда (б).

Исходный ряд приведен на верхнем графике, диаграмма снизу показывает знак регрессионной производной для разных p : серый цвет соответствует росту исходной функции, светло-серый — убыванию, темно-серый — зонам экстремума. Схожесть результатов на нижней диаграмме демонстрирует устойчивость работы метода при анализе зашумленных данных.

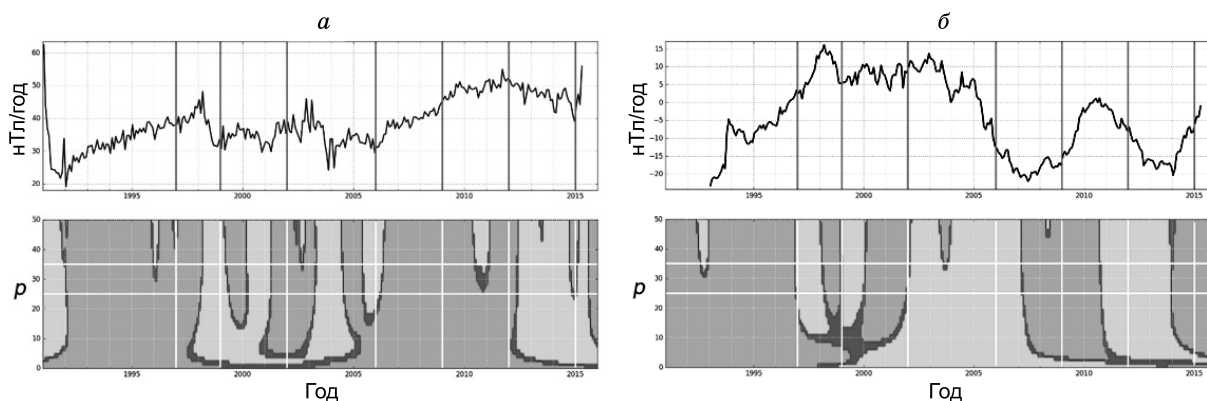


Рис. 15. Анализ ВХ по данным обсерваторий NGK ($dY/\text{год}$, Германия) (а) и ТАМ ($dZ/\text{год}$, Алжир) (б) за период 1991.0—2015.3 гг.

Выбранный диапазон p обозначен горизонтальными белыми линиями на нижней диаграмме; ранее изученные всплески ВУ 1996-1997, 1999, 2002, 2006, 2009, 2012 и 2014—2015 гг. помечены вертикальными линиями. Остальные обозначения аналогичны рис. 14 [Агаян и др., 2019].

Как видно из представленных результатов, необходимым условием достоверного определения джерков является высокое качество исходных обсерваторских наблюдений. В стандартной практике ИНТЕРМАГНЕТ подготовка годового массива окончательных данных по его прошествии составляет более одного года [Love, Chulliat, 2013]. В недавней работе [Pavón-Carrasco et al., 2021] сообщалось об обнаружении нового джерка 2020 г. по данным прямых наблюдений спутников созвездия Swarm [Friis-Christensen et al., 2006] за 2015—2021 гг. Важно отметить, что он пока не был детектирован ни одной из существующих моделей главного МПЗ в силу их нечастой периодичности обновления.

В отличие от спутниковых наблюдений, которые изначально имеют высокое качество, обсерваторские данные требуют трудоемкой обработки для устранения шумов, коррекции с учетом базисной линии и расчета полных значений компонент МПЗ. В отношении данных обсерваторий «Санкт-Петербург» (IAGA-код SPG, Ленинградская обл.) и «Климовская» (IAGA-код KLI, Архангельская обл.), функционирование которых обеспечивается полностью силами ГЦ РАН, используется полный функционал АПК МАГНУС для ежемесячной подготовки так называемых квазиокончательных данных и последующей ежегодной подготовки окончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Благодаря новым математическим подходам, которые обеспечивают обработку непрерывно поступающих данных с минимальной задержкой по времени [Кудин и др., 2021], нами был оперативно детектирован джерк 2020 г. по данным этих двух обсерваторий за период 2015—2022 гг. [Соловьев и др., 2022а]. Этот джерк наряду с известным ранее джерком 2017 г. можно наблюдать на рис. 16 в виде локальных экстремумов на сглаженном ВХ.

Незначительный (около 2 мес.) сдвиг исследуемых экстремумов по времени между обсерваториями обусловлен, во-первых, зашумленностью исходных данных внешними полями и, во-вторых, асинхронным проявлением одних и тех же джерков в различных регионах Земли, которое в глобальном масштабе может варьироваться в пределах 1—2 лет. Таким образом, по данным отдельных обсерваторий, не дожидаясь появления очередных глобальных моделей, можно исследовать процессы, определяющие глобальную динамику МПЗ, при условии, что эти данные высокого качества.

Несмотря на указанный прогресс в области исследования земного магнетизма, природа быстрых вариаций главного МПЗ по-прежнему остается не до конца изученной. Любые новые открытия в этой области вносят несомненный вклад в понимание их природы. Так, сохраняющаяся периодичность наблюдаемых всплесков векового ускорения и порождаемых ими джерков, составляющая примерно три года с момента обнаружения первого джерка [Courillot et al., 1978], указывает на возможную волновую природу стоящих за ними процессов в жидком ядре [Lesur et al., 2022]. Выделенные джерки 2017 и 2020 гг. подтверждают сохранение этой периодичности и по сей день. Последний, по всей видимости, является следствием недавнего всплеска векового ускорения радиальной компоненты МПЗ на границе ядро—мантия за эпоху 2018.5 [Pavón-Carrasco et al., 2021].

Как отмечалось ранее, продолжительные векторные спутниковые наблюдения МПЗ появились лишь в конце 1990-х гг. До этого, с начала 1960-х гг. из космоса регистрировались только скалярные измерения модуля вектора МПЗ, которые, несомненно, также представляют большой интерес. В этой связи необходимо отметить большой труд исследовательских групп, осуществляющих оцифровку ана-

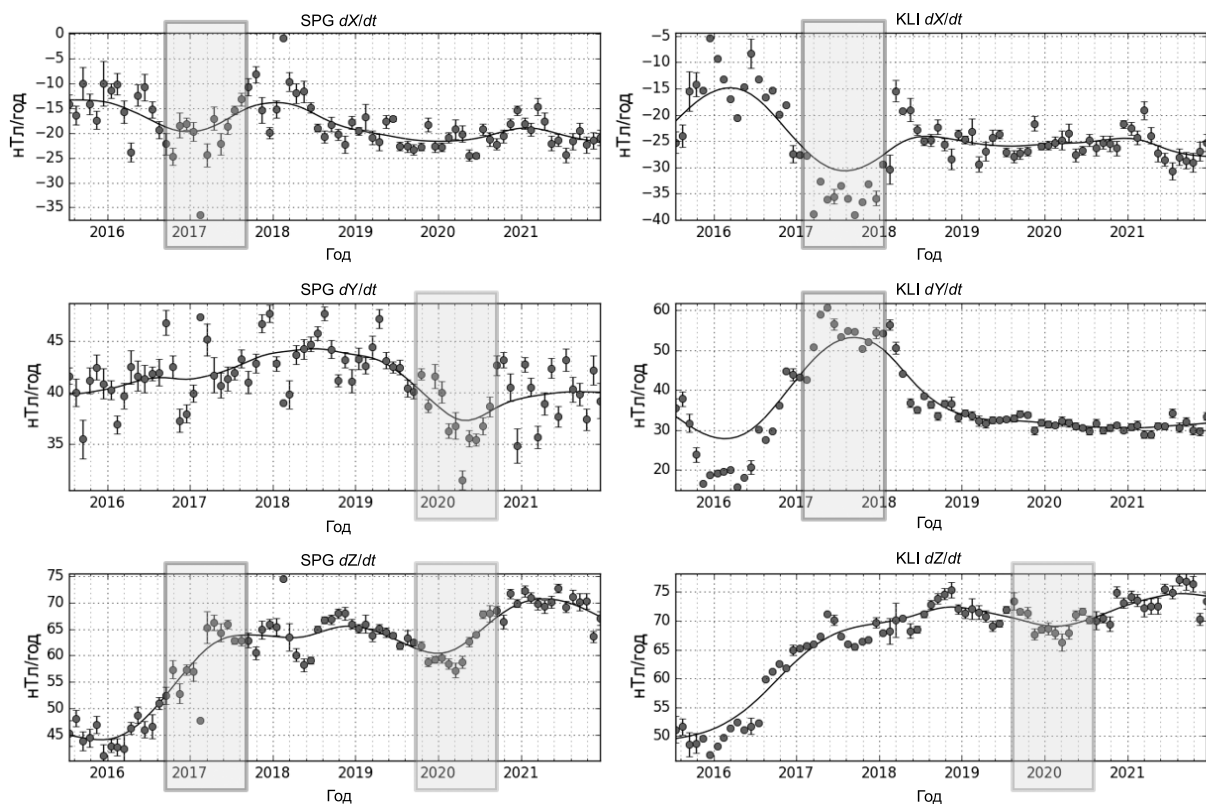


Рис. 16. BX компонент X, Y и Z по данным обсерваторий SPG и KLI.

На каждом графике точками обозначены значения BX, рассчитанного по среднемесячным обсерваторским данным, с указанием доверительных интервалов; черным обозначена сглаженная кривая. Временные интервалы детектированных джексов 2017—2018 и 2020 гг. отмечены прямоугольниками [Соловьев и др., 2022a].

логовых массивов исторических данных, хранящихся в архивах мировых центров данных (МЦД). Так, например, в 2020 г. сотрудниками МЦД по солнечно-земной физике в Москве был оцифрован ценный массив скалярных наблюдений МПЗ, которые выполнялись в рамках одних из первых геомагнитных спутниковых миссий Космос-49 (1964 г.) и Космос-321 (1970 г.), запущенных в СССР [Krasnoperov et al., 2020]. Такие данные позволяют проводить ретроспективную верификацию исторических моделей главного МПЗ, базирующихся в основном на данных наземных наблюдений. При должном учете так называемого «эффекта Бакуса», связанного с неоднозначным восстановлением полного вектора МПЗ в результате инверсии только скалярных наблюдений [Stern, Bredekamp, 1975], такие данные также позволяют строить глобальные аналитические модели МПЗ [Soloviev, Peregoudov, 2022]. В результате, с привлечением дополнительно данных наземных обсерваторий появляется возможность получения более точной оценки BX на базе разных моделей (рис. 17).

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

С 2020 г. начался новый, 25-й цикл солнечной активности. Откликом является существенно возросшее число геомагнитных бурь, регистрируемых наземными магнитными станциями и обсерваториями в течение последнего года. Во второй половине 2022 г. они наблюдаются в среднем 1—2 раза в месяц (https://isgi.unistra.fr/data_plot.php). Существенным является и то обстоятельство, что наблюдаемая активность Солнца текущего цикла уже значительно выше прогнозных значений (рис. 18). Это требует более тщательного мониторинга и анализа космической погоды в целях бесперебойного функционирования технологических систем, подверженных ее проявлениям.

Источником внешних магнитных вариаций, регистрируемых на поверхности Земли и в околоземном пространстве, являются разномасштабные как по времени, так и по пространству токовые системы в ионосфере и магнитосфере, порождаемые в результате взаимодействия солнечного ветра с околоземной средой. Некоторые из них существуют постоянно и обладают сезонной изменчивостью, другие носят спорадический характер и проявляются в периоды магнитных бурь. К первым, в частности, от-

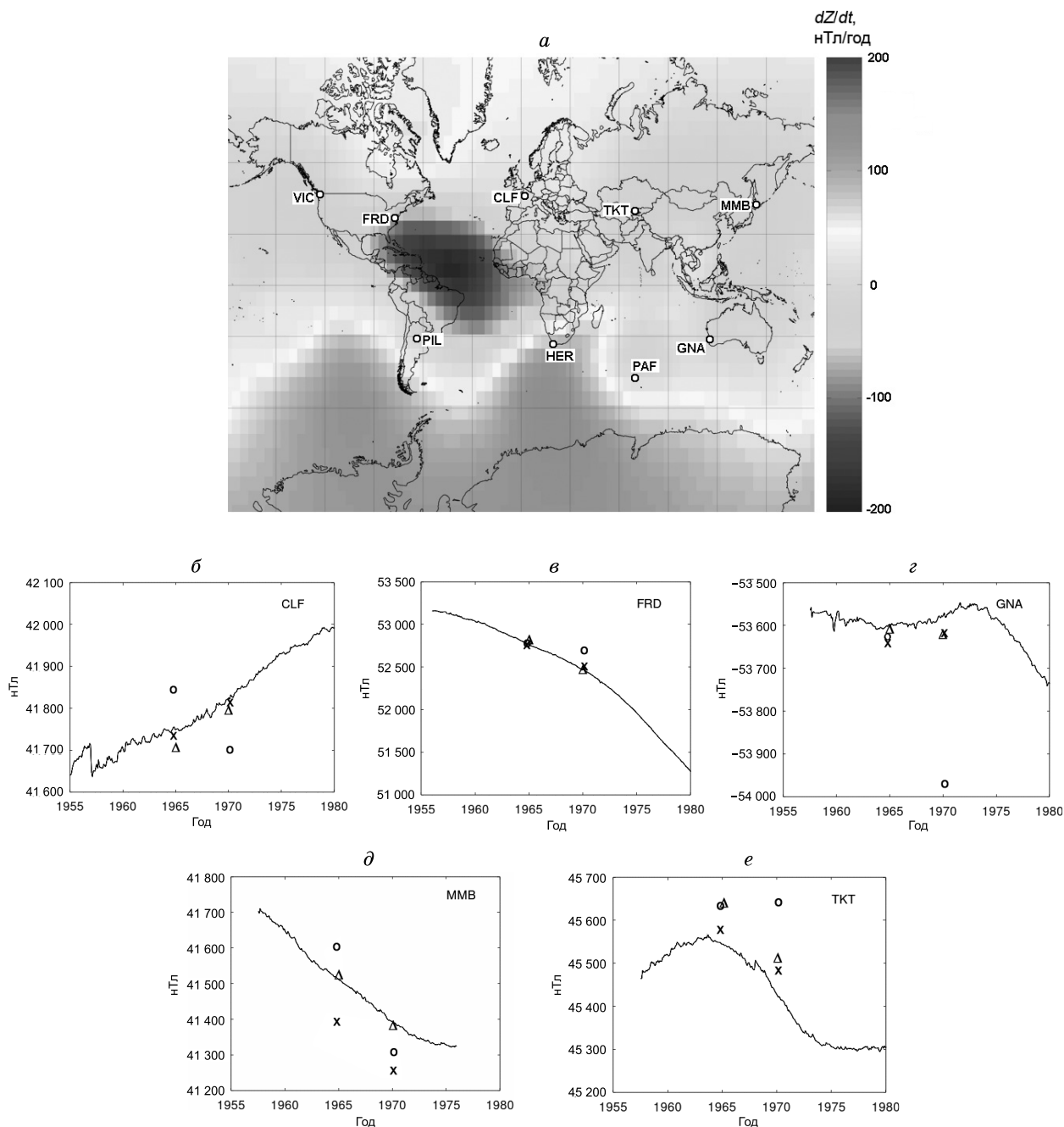


Рис. 17. Верификация различных моделей ВХ за 1964—1970 гг. с использованием данных спутников Космос-49 (1964 г.), Космос-321 (1970 г.) и среднеширотных обсерваторий.

На карте (а) приведены значения ВХ Z-компоненты за 1965—1970 гг. согласно модели IGRF и отобранные для верификации обсерватории. На графиках (б)—(е) приведены среднемесячные значения Z-компоненты МПЗ, измеренные на некоторых из отобранных обсерваторий за 1955—1980 гг. (черная линия) и спрогнозированные моделью IGRF за 1965 и 1970 гг. (треугольники), моделью ИЗМИРАН за 1964 и 1970 гг. [Долгинов и др., 1967, 1976] (крестики) и вновь предложенной моделью по данным Космос-49 и Космос-321 за 1964 и 1970 гг. [Soloviev, Peregoudov, 2022] (кружки).

носится геомагнитная вариация S_q , порождаемая волновым излучением Солнца. Основной ее механизм связан с генерацией токов вследствие динамоэффекта в освещаемом E -слое ионосферы [Yamazaki, Maute, 2017]. Спутниковые данные используются для построения аналитических моделей эквивалентной токовой системы S_q [Chulliat et al., 2016; Yamazaki, 2022], описывающих ее состояние в прошлом; данные магнитных обсерваторий позволяют получать оценку ее текущего состояния с минимальной задержкой по времени. Поскольку данные обсерваторий содержат в себе весь спектр геомагнитных ва-

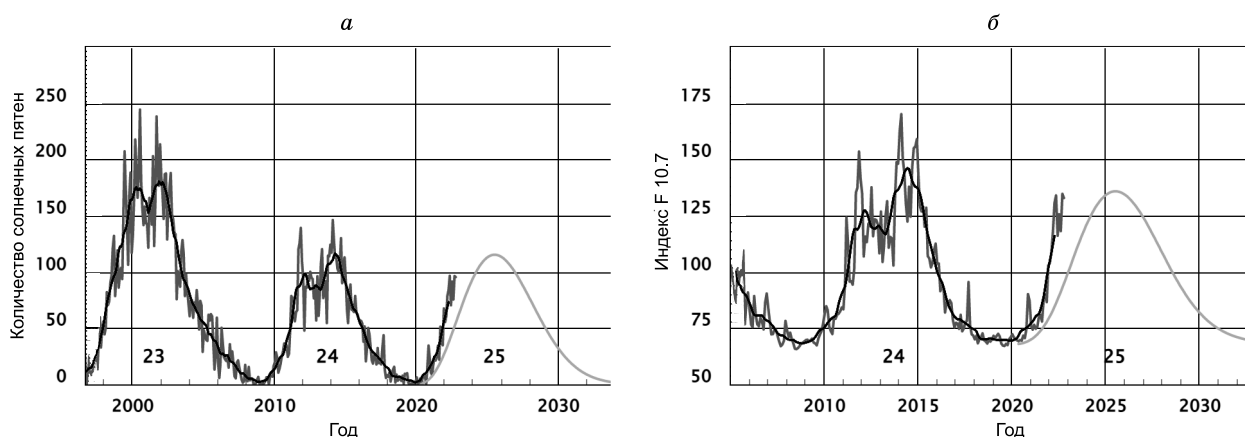


Рис. 18. Солнечная активность за 23—25 циклы: количество солнечных пятен (а) и значения индекса солнечной радиации на волне 10.7 см (б).

Среднемесячные значения показаны темно-серым цветом, построенная по ним сглаженная кривая — черным цветом, прогнозная кривая — светло-серым цветом (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>).

риаций от секунд до суток, первоочередной задачей является распознавание магнитоспокойных дней и последующего корректного выделения сигнала S_q -вариации.

В работе [Соловьев, Смирнов, 2018] был предложен алгоритм распознавания магнитоспокойных дней на базе нечеткой логики (рис. 19, а) и показаны его преимущества по сравнению с классическим подходом IAGA, основанным на ретроспективном определении магнитоспокойных дней по значениям геомагнитных индексов [Johnston, 1943]. Изначально этот метод был предложен для отбора исходных обсерваторских данных для построения моделей главного МПЗ, но впоследствии нашел применение и для изучения сезонной изменчивости токовой системы S_q (см. рис. 19, б).

Одновременная обработка данных всех доступных обсерваторий мировой сети дает возможность оценивать глобальное распределение амплитуд S_q -вариации по всем компонентам как функцию от времени (месяц, сезон, ...). Кроме того, в [Soloviev et al., 2019b] предложена методика восстановления эквивалентной токовой системы S_q по результатам выделения S_q -вариации с использованием данных 121

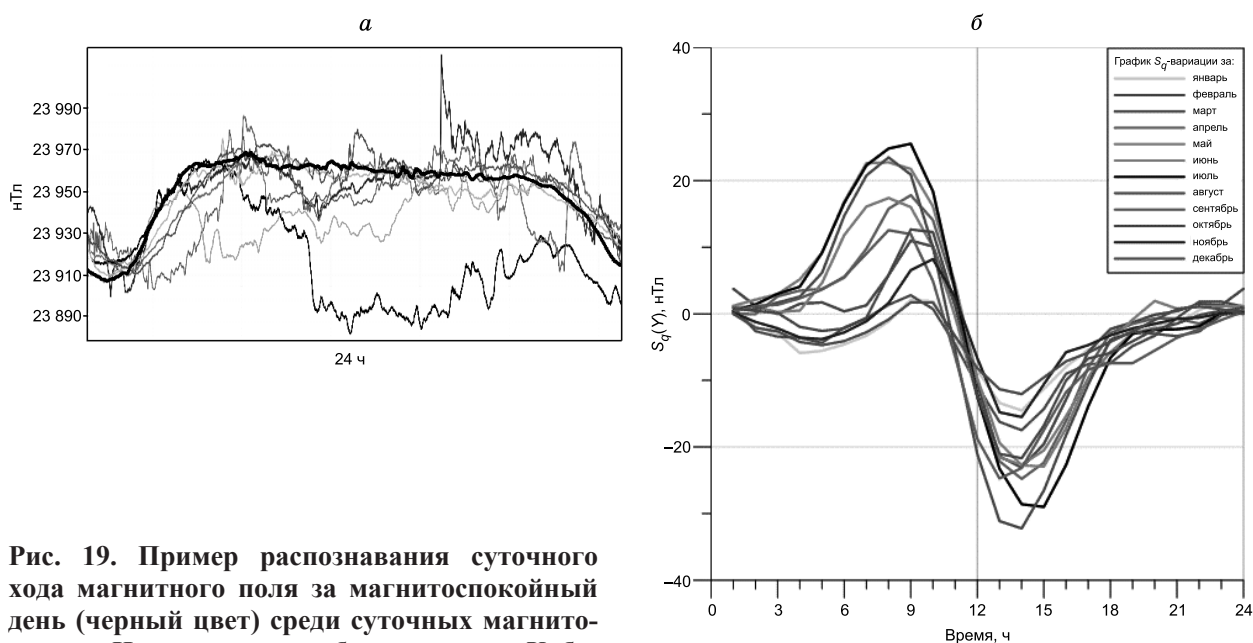


Рис. 19. Пример распознавания суточного хода магнитного поля за магнитоспокойный день (черный цвет) среди суточных магнитogramм H -компоненты обсерватории «Хабаровск» (разные оттенки серого) (а) и помесичное выделение S_q -вариации за 2008 г. по данным Y -компоненты обсерватории «Шамбон-ля-Форэ» (CLF, Франция) (б) [Soloviev et al., 2019b].

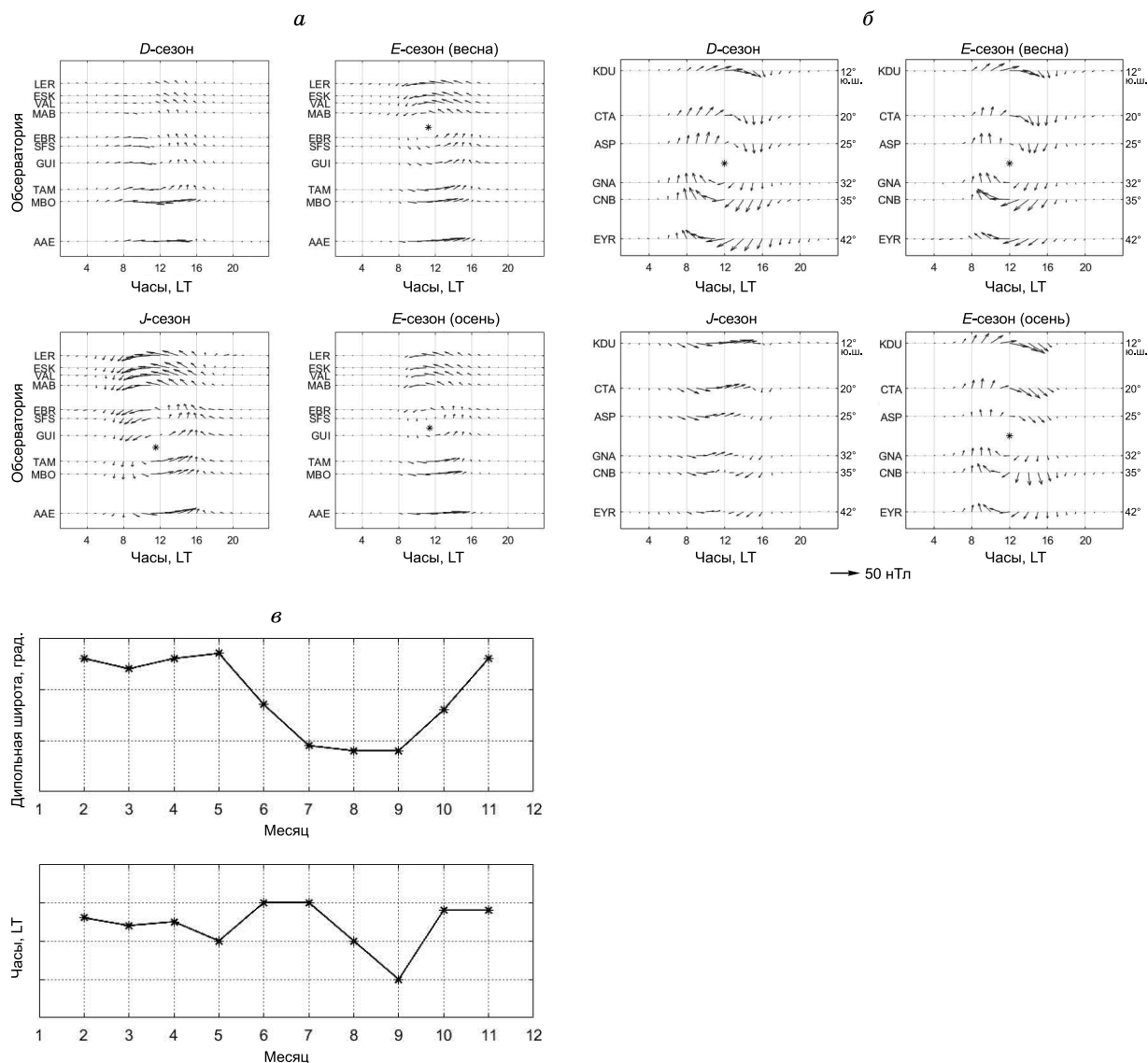


Рис. 20. Моделирование эквивалентной токовой системы S_q по данным мировой сети обсерваторий за 2008 г.:

сезонные токовые вихри S_q в Северном (а) и Южном (б) полушариях (распознанные центры вихрей отмечены звездочкой) и помесичное изменение геомагнитной широты и локального времени положения центра вихря S_q в Северном полушарии (в) [Soloviev et al., 2019b].

магнитной обсерватории. Результаты восстановления усредненных сезонных токовых вихрей S_q в обоих полушариях, а также графики смещения центра северного вихря за 2008 г. представлены на рис. 20. Токовые вихри S_q показали четкую зависимость от солнечной активности, практически распадаясь в течение местных зимних сезонов (сезон J в Южном полушарии и сезон D в Северном полушарии) и вновь формируясь в ярко выраженные петли при наступлении местного лета.

Задача распознавания вихревых токовых структур остро стоит и в полярных областях ионосферы. В этой зоне они могут носить локализованный характер и иметь характерное время существования порядка 10–20 мин, однако в таких формированиях сосредоточена основная энергия нестационарных магнитосферно-ионосферных возмущений. Именно они ответственны за всплески интенсивности геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), оказывающих крайне негативное воздействие на энергетическую систему в высоких широтах. Наземным отражением подобных событий служат изолированные импульсные возмущения магнитного поля с характерными временными масштабами ~10 мин и амплитудами до первых сотен нТл (рис. 21).

Нами была предложена автоматизированная система обнаружения вихревых токовых структур в полярной ионосфере по данным высокоширотной сети геомагнитных станций [Чинкин и др., 2020].

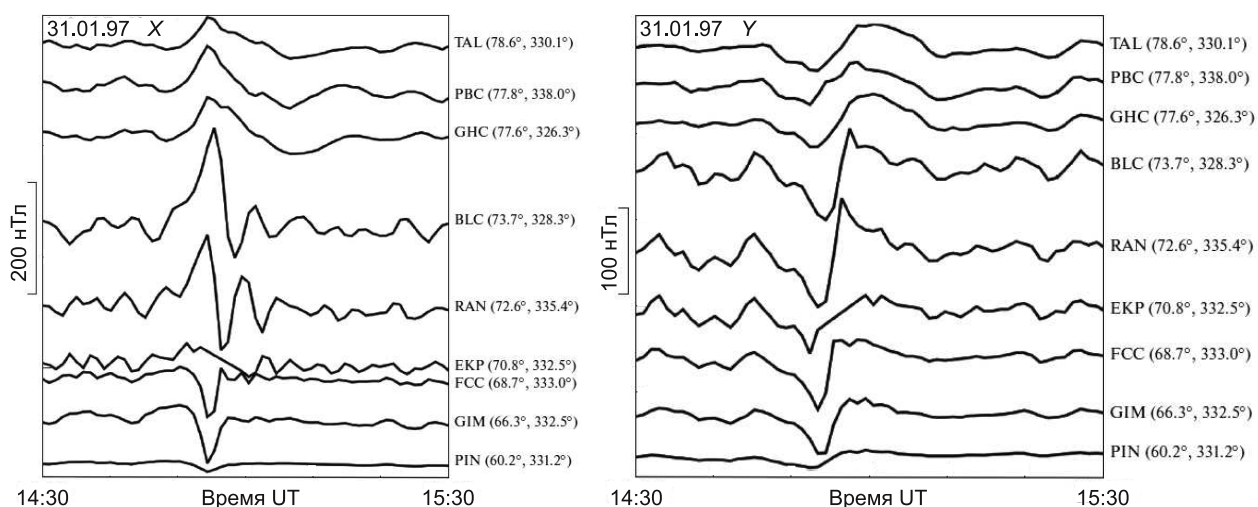


Рис. 21. Импульс дневного конвективного холловского вихря, зарегистрированный 31.01.97 на меридиональном профиле высокоширотных магнитных станций сети SuperMAG (геомагнитные компоненты X , Y).

У правой оси ординат даны коды станций и их геомагнитные координаты [Чинкин и др., 2020].

Реконструируемое при этом магнитное векторное поле является потенциальным, а векторное поле эквивалентного ионосферного тока — бездивергентным. Разработанный подход не только дает возможность автоматически находить несколько вихревых структур, но и численно определять текущие значения их динамических параметров: пространственную структуру продольных токов (положение центра и размер вихревого образования), траекторию и групповую скорость горизонтального распространения вихря вдоль ионосферы, а также направление, интенсивность продольного тока и циркуляцию тока по радиусу вихря.

Методика была применена к анализу структуры дневных конвективных вихрей в ионосфере TCV (traveling convection vortices) [Glassmeier, 1992], которые являются хорошо известным и наглядным проявлением импульсного воздействия солнечного ветра на магнитосферу [Kataoka et al., 2002]. Результаты распознавания вихрей (рис. 22) показывают, что характерный размер TCV-вихря составляет ~ 500 км, порядок величины продольного тока до ~ 0.2 А/км² при величинах возмущения геомагнитного поля ~ 150 нТл. Оценивая взаимное расположение распознанных вихрей, можно наблюдать парное чередование втекающих и вытекающих продольных токов, формирующих соседние вихри. Данное наблюдение согласуется с общепринятым представлением о замыкании приходящих из магнитосферы продольных токов в проводящем E -слое ионосферы, образующих пары противоположно направленных токов. Таким образом, предлагаемая методика позволяет выделять иерархии вихрей с различными пространственными масштабами.

Другим приложением разработанной методики послужило изучение ночных пульсаций типа Ps6 [Connors et al., 2003], которые проявляются в виде квазипериодических импульсных возмущений магнитного поля длительностью ~ 10 — 15 мин в данных магнитных станциях (рис. 23). Результаты исследования подтвердили, что пульсации типа Ps6 порождаются квазипериодической последовательностью дрейфующих в восточном направлении вихрей, управляемых локализованными (радиусом ~ 200 — 250 км) продольными токами с плотностями до ~ 5 мкА/м². При этом каждый такой вихрь вызывает всплеск ГИТ до ~ 100 А [Chinkin et al., 2021]. Таким образом, предложенные алгоритмы могут быть широко использованы исследователями в области солнечно-земной физики и геофизики для автоматического выделения локальных экстремальных возмущений геомагнитного поля, которые могут быть ответственны за всплески ГИТ в энергетических системах.

По-прежнему не представляется возможным прогнозировать амплитуду экстремальных геомагнитных событий с помощью физического моделирования. Для количественной оценки амплитуды возможных экстремальных событий необходим статистический анализ. Существует множество количественных показателей, характеризующих геомагнитную активность. К ним относятся интенсивность солнечных вспышек, скорость выброса корональной массы, количество солнечных пятен и ряд индексов геомагнитной активности. Однако большинство из них стали доступны только недавно с развитием цифровых систем мониторинга. Вместе с тем K -индекс является старейшим универсальным индикатором

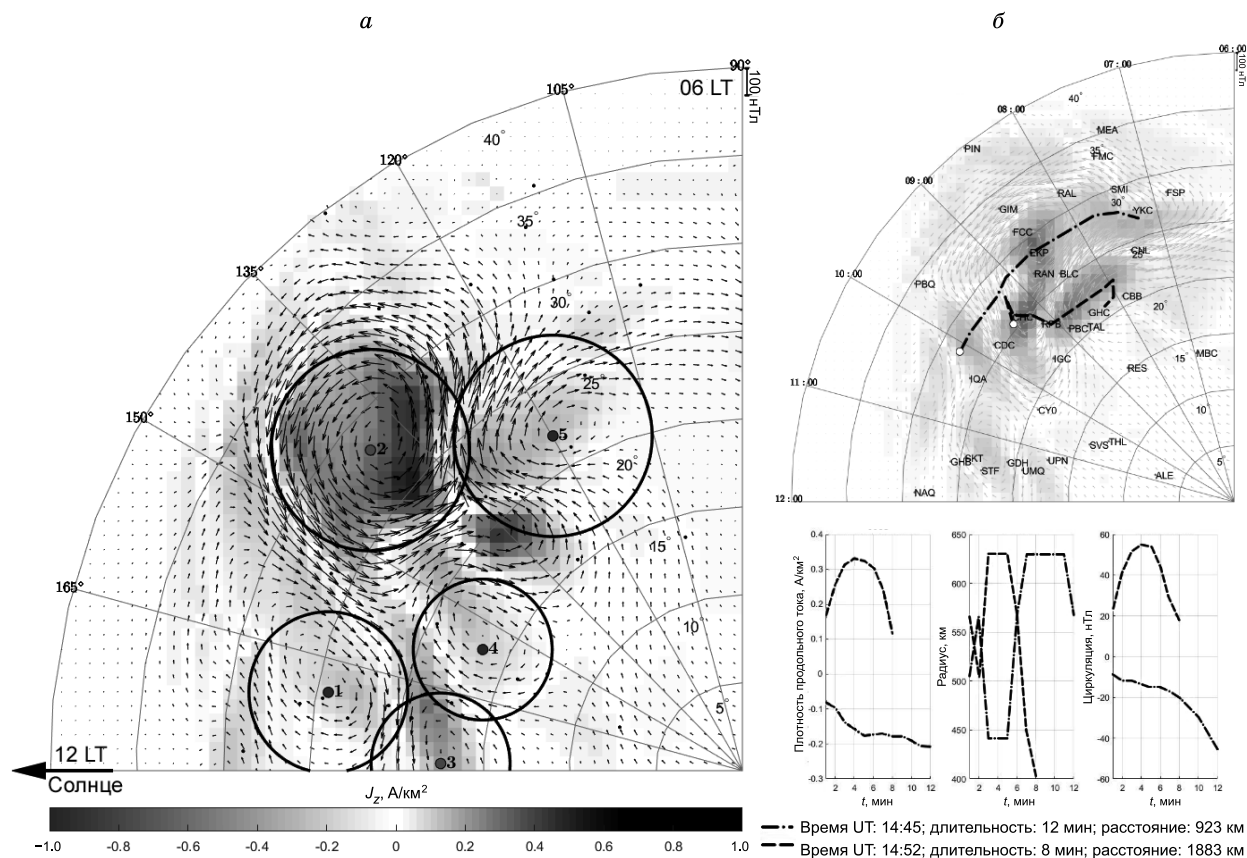


Рис. 22. Выделение пяти дополненных конвективных вихревых структур в полярной проекции на 14:53 UT 31 января 1997 г.:

отображение плоского скорректированного векторного поля эквивалентного ионосферного тока J и величины плотности продольного тока J_z (отмечена цветом) (а). Направлению вихря по часовой стрелке соответствует втекающий ток $J_z < 0$, направлению против часовой стрелки — вытекающий ток $J_z > 0$; направление на Солнце — слева. Длина стрелки соответствует величине наземных магнитных возмущений. Траектории движения центров двух вихрей (сверху) и их динамические характеристики (снизу): плотность продольного тока, радиус и циркуляция (б) [Чинкин и др., 2020].

ром геомагнитной активности [Bartels et al., 1939]. Очевидно, это делает его уникальным инструментом для сбора статистики о геомагнитной активности за несколько 11-летних солнечных циклов. Большим преимуществом K -индекса является его безразмерность и калибровка между обсерваториями по сравнению с индексом D_{st} или региональными вариациями интенсивности (например, амплитудами H -компоненты), которые сильно зависят от местоположения обсерватории. В работе [Soloviev et al., 2021] исследовались региональные особенности геомагнитной активности за последние шесть солнечных циклов (1954—2020 гг.) по целой компиляции данных K -индекса семи обсерваторий в севе-

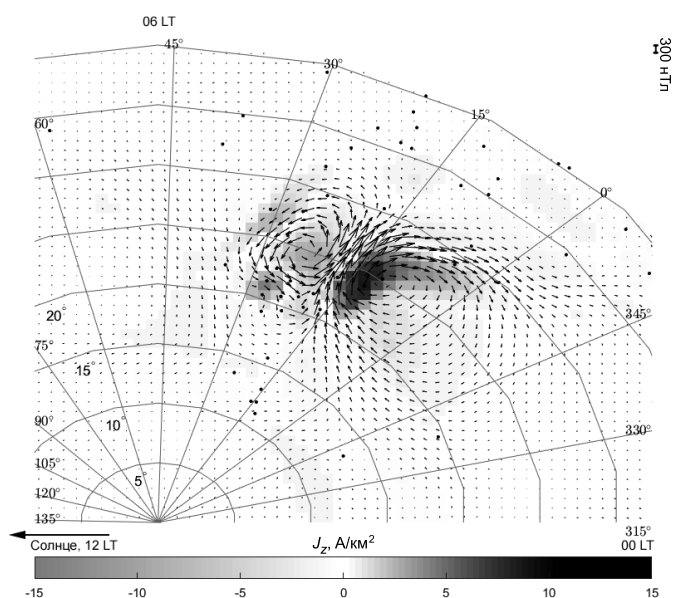


Рис. 23. 2D векторное поле эквивалентного ионосферного тока J , построенное на момент времени 02:53 UT 29 июня 2013 г. в географических координатах [Chinkin et al., 2021].

Обозначения аналогичны рис. 22.

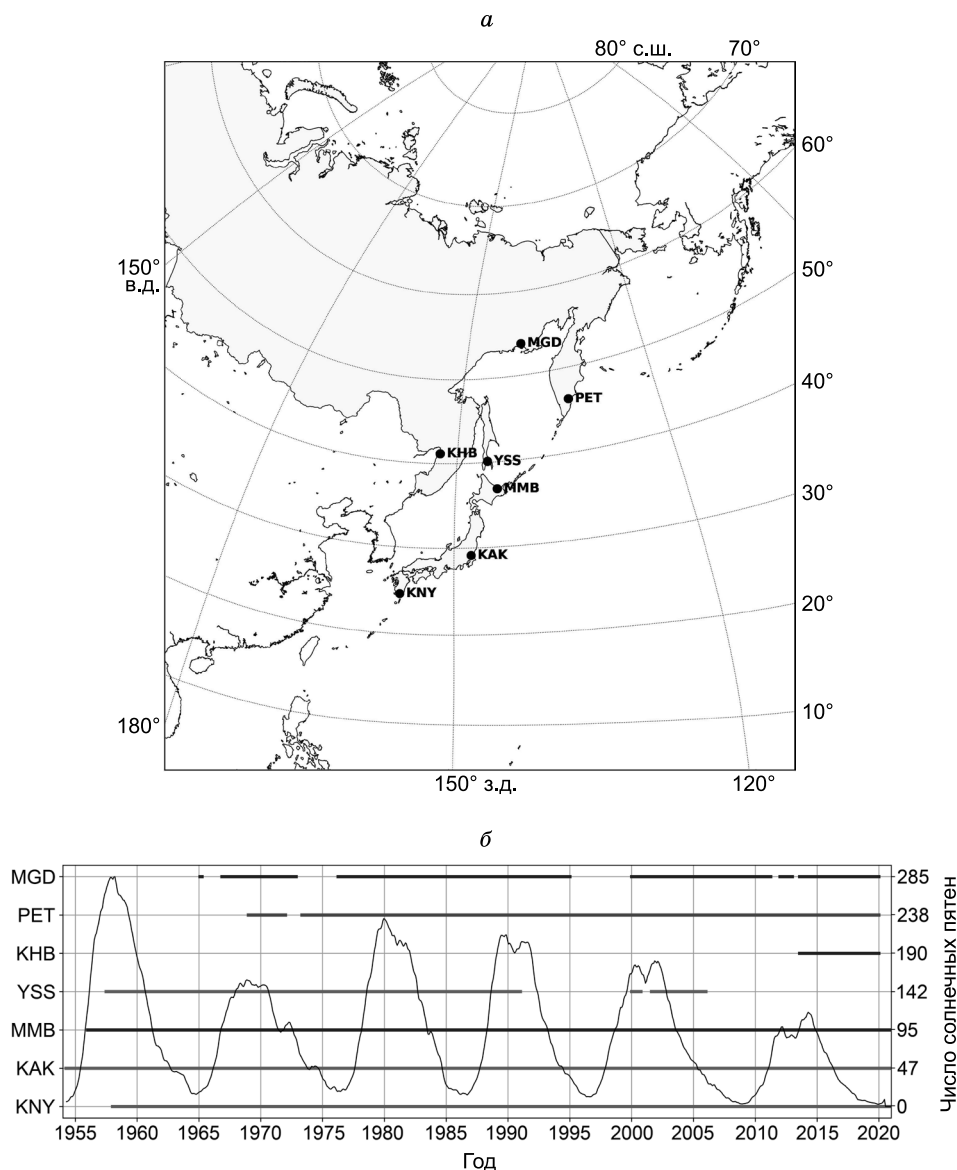


Рис. 24. Карта обсерваторий, предоставивших K -индексы, с указанием геомагнитных параллелей и меридиан на эпоху 2006.0 (а), доступность их данных (горизонтальные линии) и количество солнечных пятен (черная кривая) с 1954 г. (б).

ро-западной части Тихого океана [Sergeyeva et al., 2021; <http://www.kakioka-jma.go.jp/en/>]. К счастью, этот регион расположен в средних и низких широтах между крупномасштабным воздействием кольцевого тока и сильными полярными электроджетами, сопровождающими значительные магнитные бури (рис. 24). Благодаря такой геомагнитной однородности рассматриваемый регион является репрезентативным для изучения региональных особенностей геомагнитных возмущений. Цель заключалась в определении законов повторяемости геомагнитных событий по значениям K -индекса.

В ходе исследования была обнаружена высокая корреляция между частотными распределениями повторяемости K -индекса для каждой пары из семи рассмотренных обсерваторий за весь период исследования. Это свидетельствует об идентичных распределениях K (с надлежащим масштабированием) на всех обсерваториях. Было установлено, что значения K -индекса из всего диапазона ($K \geq 0$) подчиняются семейству нормальных законов распределения, тогда как экспоненциальный закон распределения лучше всего подходит для набора данных $K \geq 2$. Выявленные законы распределения для $K \geq 0$ и $K \geq 2$ справедливы для любой фазы солнечного цикла и каждой обсерватории из рассматриваемого региона. Далее оценивалась вероятность превышения K -индекса до экстремального значения 8 одновременно на нескольких обсерваториях. Используя комплементарную кумулятивную функцию распределения было

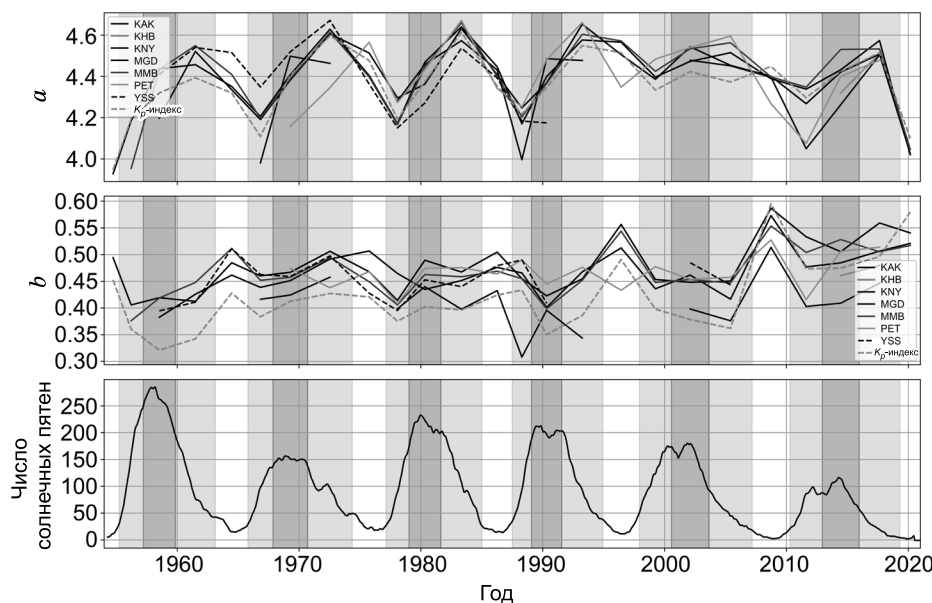


Рис. 25. Вариации коэффициентов линейной регрессии a (вверху) и b (посередине) за период 1954—2020 гг.

Число солнечных пятен показано внизу. Фазы минимума солнечной активности отмечены белыми прямоугольниками; фазы роста, максимума и спада — чередующимися светло-серыми, серыми и темно-серыми прямоугольниками соответственно. Разные цвета ломаных линий соответствуют различным обсерваториям и K_p -индексу (см. легенду на графиках) [Soloviev et al., 2021].

установлено, что вероятность обнаружения события $K \geq 8$ одновременно на всех рассматриваемых обсерваториях при условии одновременного наличия всех данных составляет меньше одной сотой процента. В то же время такая вероятность для кластеров соседствующих обсерваторий, разбитых в соответствии с характерными значениями K_9 , составляет на порядок большую величину. Результат свидетельствует о том, что пространственный масштаб экстремальных значений K -индекса составляет менее 3000 км, что важно для мониторинга и прогноза геомагнитных бурь.

Применение линейных регрессий позволило отслеживать изменение во времени характеристик частотного распределения K -индекса в терминах изменчивости линейных коэффициентов, рассчитанных для кумулятивных распределений в логарифмической шкале (оценки по R -квадрат свидетельствовали о высоком качестве подобной аппроксимации). Анализ временных изменений как коэффициентов линейной регрессии (рис. 25), так и повторяемости различных значений K -индекса за год (рис. 26) на отдельных обсерваториях и на совокупности всех обсерваторий показывает, что периодические и вековые вариации хорошо коррелируют с изменением числа солнечных пятен за последние шесть солнечных циклов — большие значения K -индекса совпадают с фазами спада [Gvishiani, Soloviev, 2020], а меньшие значения тяготеют к возрастающим фазам солнечной активности [Куражковская, 2020]. Вместе с общим уменьшением пиковых значений солнечных пятен количество меньших значений K -индекса (спокойных периодов) становится больше, а количество больших значений K -индекса (возмущенных периодов) становится меньше. Эти тенденции справедливы и для отдельных обсерваторий, и для всей совокупности обсерваторий, и для распределения планетарного индекса K_p . Результаты свидетельствуют о свойстве самоподобия геомагнитной активности на средних широтах и применимости вычисленных коэффициентов для изучения региональных особенностей геомагнитной активности на временных масштабах, сравнимых с солнечной цикличностью, и даже для прогноза частотных распределений K -индекса. Высокая согласованность в изменчивости коэффициентов для региональных (K) и планетарного (K_p) индексов свидетельствует о справедливости выявленных геомагнитных особенностей и для других регионов.

НЕКОТОРЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМАГНЕТИЗМА

Ряд отраслей промышленности требуют непрерывного мониторинга, учета и прогноза состояния космической погоды для корректного функционирования соответствующих технологических систем. К ним относится высокотехнологичная методика наклонно-направленного бурения нефтегазовых сква-

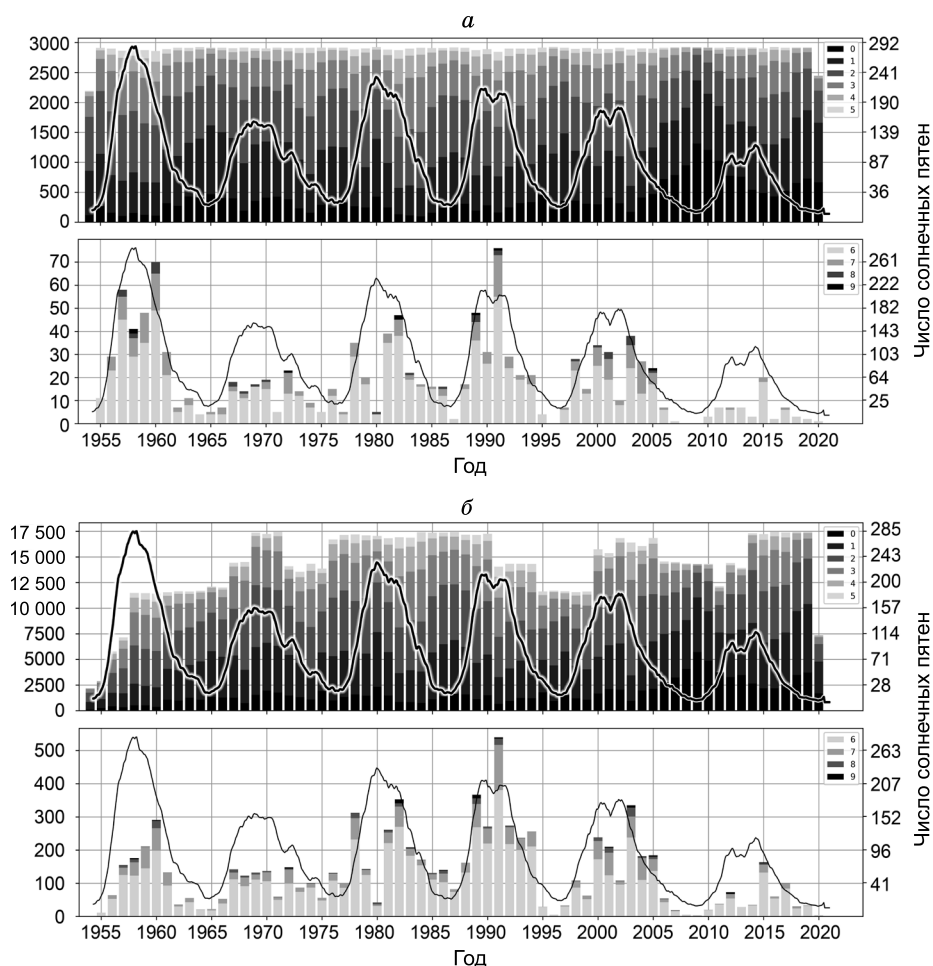


Рис. 26. Повторяемость различных значений K -индекса по годам как функция от времени на обсерватории КАК (Япония, *а*) и интегрально на всех обсерваториях (*б*) за 1954—2020 гг.

Верхний и нижний графики показывают составные гистограммы для событий $K = 0—5$ и $K = 6—9$ соответственно; цветовая схема для каждой гистограммы приведена в легенде. Число солнечных пятен (черный график) нанесено поверх гистограмм [Soloviev et al., 2021].

жин, предусматривающая прокладывание протяженных скважин (достигающих в длину более 10 км) преимущественно в горизонтальном направлении. Как правило, такие скважины имеют сложный пространственный профиль ствола из-за необходимости многоствольного (кустового) бурения. Во избежание их пересечения требуется высокая точность позиционирования и навигации буровой колонны в реальном времени. Такую точность обеспечивает навигация по геомагнитному полю [Roedjono et al., 2013]. Однако в высоких широтах, где сейчас идет активное освоение углеводородных ресурсов арктического шельфа, во время магнитных бурь вариации магнитного склонения могут превышать 10° . Очевидно, такие геомагнитные возмущения могут вносить неприемлемые искажения в навигацию по МПЗ, поскольку допустимые отклонения азимута скважины не должны превышать 2° [Гвишиани, Лукьянова, 2018]. В этой связи используется параллельный высокоточный мониторинг МПЗ для учета его спорадических вариаций и коррекции инклинометрии.

В работе [Соловьев и др., 20226] было проведено изучение влияния спорадических изменений магнитного поля во время геомагнитных бурь на ключевые параметры траектории бурения скважины при навигации по МПЗ. Исследовались закономерности отклонений параметров профиля скважины во время геомагнитных возмущений различной интенсивности, а именно за период четырех бурь со значениями геомагнитных индексов D_{st} от -98 до -174 нТл и AE от 1428 до 2677 нТл. В численных экспериментах в качестве показаний скважинных магнитометров использовались реальные наблюдения выбранных магнитных обсерваторий и станций (виртуальных месторождений) и предполагалось отсутствие параллельного мониторинга МПЗ на близлежащих стационарных пунктах наблюдений. Отклонения

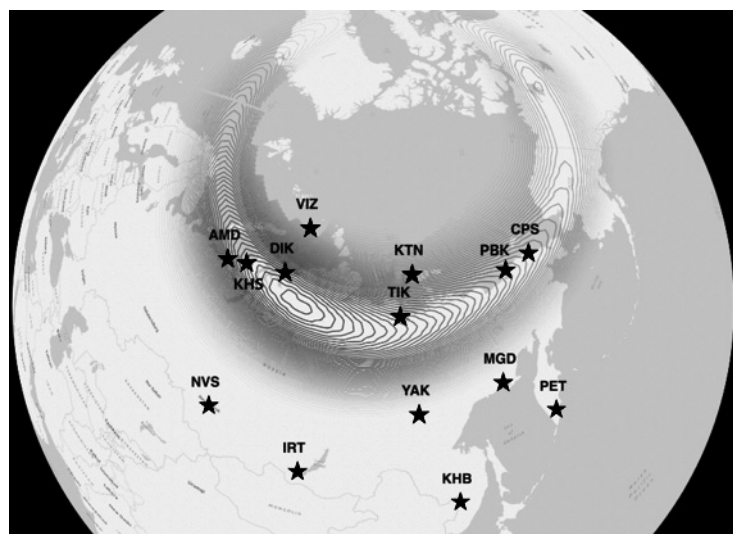


Рис. 27. Карта рассматриваемых виртуальных месторождений (т. е. положений обсерваторий и станций), помеченных звездами.

Авроральный овал построен согласно эмпирической модели OVATION [Newell et al., 2014], соответствующий веб-сервис доступен по адресу <http://aurora-forecast.ru/> [Vorobev et al., 2020]. Показано положение овала на 16:00 UT 24.12.2020.

параметров профиля скважины рассчитывались в диапазоне от средних до высоких широт, в том числе для виртуальных месторождений, расположенных внутри, на границах и за пределами аврорального овала (рис. 27).

В каждом эксперименте (т. е. для каждой бури и пункта наблюдений) производился расчет следующих ключевых траекторных параметров модельной скважины вдоль длины ствола: приращения координат (м), азимут скважины (град.), отклонение от проектных координат (м), азимут смещения от устья скважины (град.) и угол пространственного искривления ствола на 10 м (град./10 м). Все указанные величины рассчитывались параллельно для проектного профиля скважины (за невозмущенный период) и фактического профиля (за период возмущенного поля) (рис. 28). Для получения обобщенной оценки влияния широты на отклонения рассматриваемых параметров скважины по каждому из них для каждого пункта наблюдений и бури были посчитаны следующие статистические показатели: норма L1, норма L2, максимальное отклонение за рассматриваемый период (рис. 29) и среднеквадратичное отклонение (СКО).

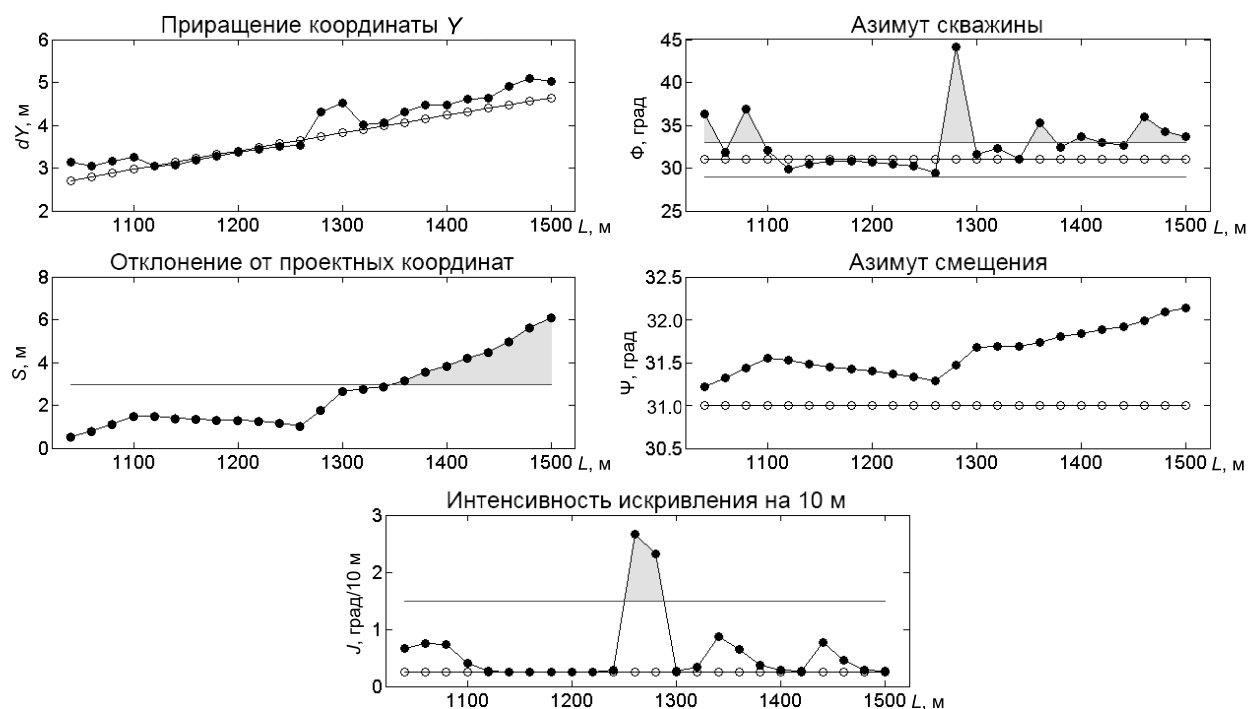


Рис. 28. Пример расчета траекторных параметров модельной скважины вдоль длины ствола L (горизонтальная ось) при бурении во время магнитной бури 06—11.09.2017 по данным обсерватории «Диксон» (DIK).

Проектные значения параметров показаны белыми кружками, фактические — черными. Горизонтальные линии — предельно допустимые отклонения. Каждый график отражает значения, полученные в течение одних суток, что соответствует примерно 500 м прокладки скважины [Соловьев и др., 2022б].

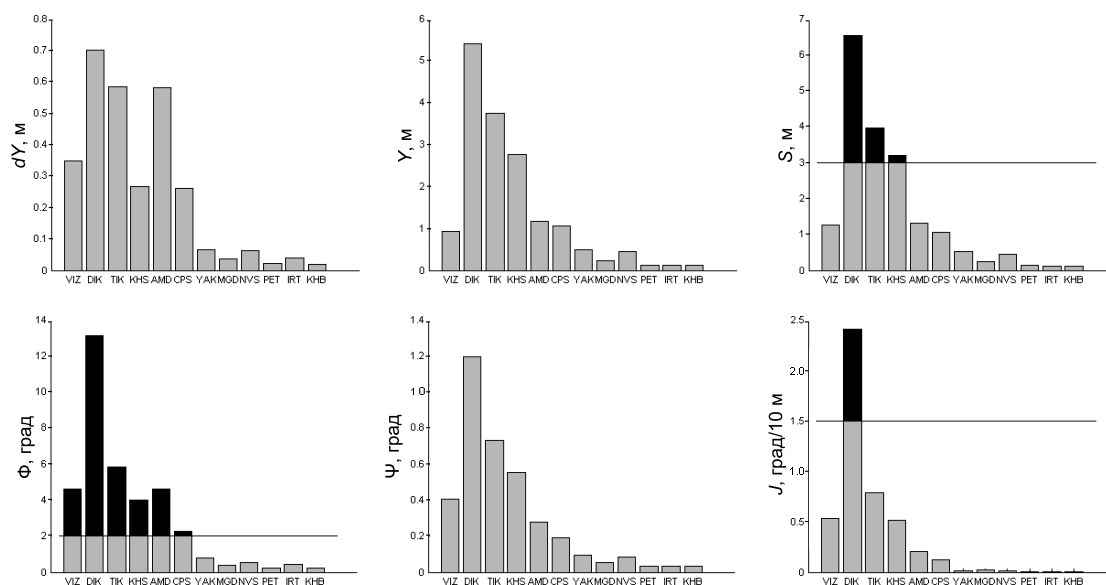


Рис. 29. Обобщенный статистический показатель «максимальные отклонения» за 8 сентября 2017 г. (геомагнитная буря 6—11.09.2017).

По горизонтальной оси пункты наблюдений упорядочены по убыванию широты; горизонтальной чертой показаны максимально допустимые отклонения для соответствующих параметров скважины [Соловьев и др., 2022б].

Таким образом, на высоких географических широтах влияние геомагнитных возмущений на геометрические параметры ствола скважины становится критическим и приводит к их недопустимому отклонению. Так, например, на высоких широтах интенсивность искривления ствола на 10 м достигает величины почти 2.5° на 10 м при максимально допустимом на практике пороге $0.7\text{—}2.0^\circ$ на 10 м проходки. Поэтому учет быстрых вариаций магнитного поля в реальном времени при помощи высокоточной магнитометрической аппаратуры является неотъемлемым элементом высокотехнологичной добычи углеводородного сырья в Арктике. Это придает исключительную актуальность задачам развертывания и поддержки стационарных геомагнитных обсерваторий в высокоширотных областях, а также развития интеллектуальных методов обработки геомагнитных измерений. К последним относится уже упомянутый АПК МАГНУС, обеспечивающий, среди прочего, многокритериальное распознавание магнитной активности в реальном времени [Gvishiani et al., 2016; Гвишиани и др., 2018]. Благодаря этому функционалу, на любой момент времени в системе имеется информация не только о текущем уровне геомагнитной активности, но и о последнем магнитоспокойном дне. Так, например, на момент начала бури 6—11.09.2017 последним магнитоспокойным днем, определенным системой, являлся 30.08.2017 (рис. 30). Данные о текущем уровне магнитной активности и спокойном уровне магнитного поля, характерном для данного региона и времени, дают возможность оперативной оценки отклонений поля от его спокойного уровня для дальнейшего принятия решений. Рассчитанные параметры скважины за 30.08.2017 показывают, что отклонения от плановых параметров в этом случае минимальны и находятся в пределах допустимых значений [Соловьев и др., 2022б], что дает возможность обеспечивать корректную навигацию буровой колонны во время сильных геомагнитных возмущений.

Другая отрасль, чувствительная к проявлениям космической погоды, — железнодорожный транспорт [Розенберг и др., 2021]. Так, сильные геомагнитные возмущения в высоких широтах могут приводить к сбоям железнодорожной сигнализации, включая ее ложные срабатывания, блокировку путей и, в конечном счете, сбоям в движении подвижного состава. Причиной сбойных явлений могут быть наведенные токи в системе железнодорожной автоматики во время значительного усиления геомагнитной активности, и, по-видимому, они происходят достаточно часто на высокоширотных участках железной дороги. Мы проанализировали информацию о случаях отказов без видимых причин (51 сигнал о ложной занятости путей) в системах сигнализации на высокоширотных участках Горьковской и Северной ж/д. Около половины таких событий были отброшены ввиду наличия информации об их причинах (механические воздействия на кабели и метеорологические факторы). Наш анализ показал совпадение по времени остальных событий с периодами мощнейших геомагнитных бурь, каждая из которых вызвала сбои в работе железнодорожной системы сигнализации (рис. 31). Было также отмечено, что моменты

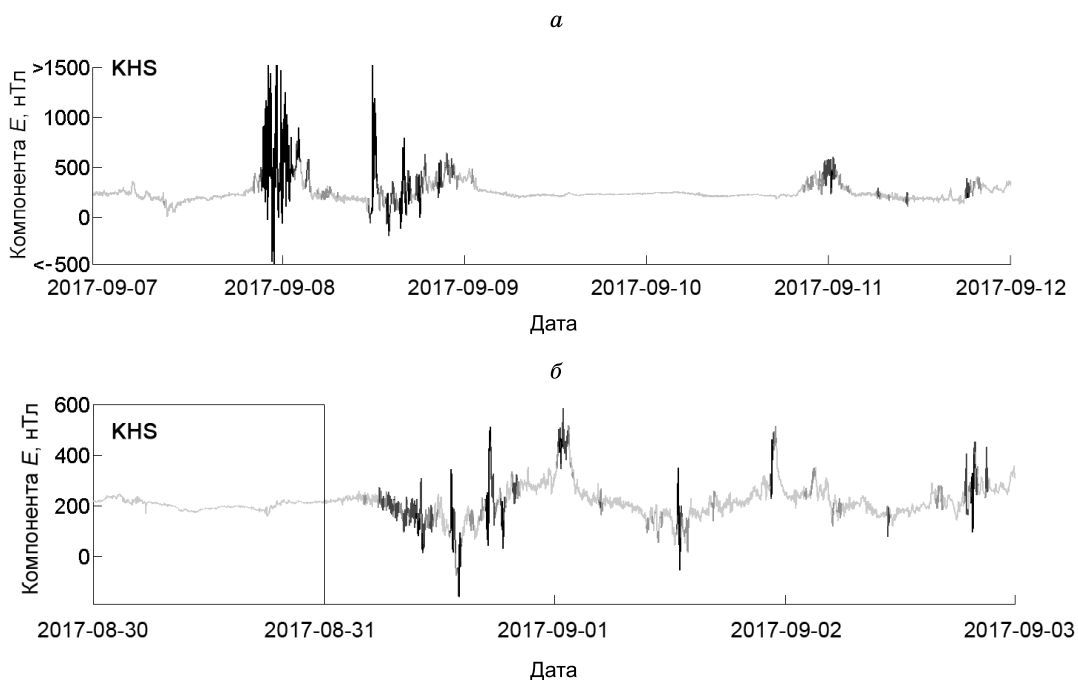


Рис. 30. Результаты автоматизированного распознавания геомагнитной активности 7—11.09.2017 по данным E -компоненты магнитной станции KHS (а) и последний магнитоспокойный день (30.08.2017, выделен прямоугольником) перед началом бури, определенный АПК МАГНУС (б).

Светло-серая маркировка соответствует фоновым значениям исходной магнитограммы, серая — слабым аномалиям, темно-серая — аномалиям и черная — сильным аномалиям (<http://geomag.gcras.ru>).

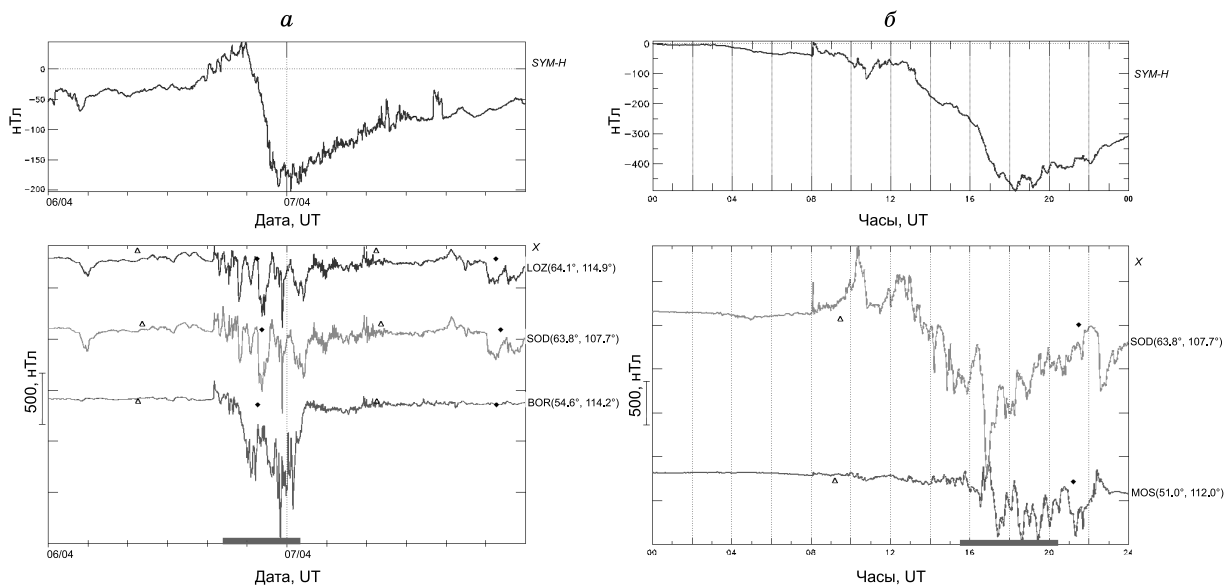


Рис. 31. Геомагнитно-возмущенные периоды во время бури 6—7 апреля 2000 г. с $|D_{st}| \sim 200$ нТл (а) и 20 ноября 2003 г. с $|D_{st}| \sim 480$ нТл (б), во время которых наблюдались сбои в работе системы сигнализации Северной ж/д.

На нижних графиках приведено сопоставление геомагнитных вариаций (X -компонента) на субавроральных (станции LOZ, SOD) и средних (станции BOR, MOS) широтах со сбоями в работе сигнальной автоматики на Северной ж/д. Горизонтальная серая метка соответствует времени этих событий [Пилипенко и др., 2023]. На верхнем графике приведены значения геомагнитного индекса SYM-H. Треугольники — полдень LT; ромб — полночь LT.

сбоев и нарушений приходится на периоды магнитных бурь с наибольшей вариабельностью (а не амплитудой) геомагнитного поля [Пилипенко и др., 2023]. В этой связи естественным представляется совершенствование систем тонкого мониторинга указанных эффектов космической погоды. Наиболее активные ее проявления наблюдаются в области овала полярных сияний, особенно его экваториальной границы. В интересах РЖД нами был разработан веб-сервис (<http://aurora-forecast.ru>) для визуализации вероятности полярных сияний [Воробьев и др., 2022]. Входными параметрами являются данные в реальном времени с межпланетных спутников, что дает возможность давать прогноз интенсивности сияний и положения аврорального овала с горизонтом 0.5—1.0 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безусловно, спутниковые и наземные наблюдения МПЗ эффективно дополняют друг друга и одинаково ценны во всех геомагнитных исследованиях. Именно такие данные позволяют изучать как слабые сигналы, зачастую носящие локализованный характер, так и глобальное распределение электромагнитных параметров в геосферах. При должной подготовке высокоточные наблюдения полного вектора МПЗ обсерваторского класса дают возможность изучения глобальных процессов в недрах Земли по данным отдельных обсерваторий, без необходимости наличия данных глобальной сети и построения глобальных моделей МПЗ. Наличие высокого качества обсерваторских и спутниковых наблюдений также дает возможность оперативного детектирования быстрых вариаций главного МПЗ. Эти же данные позволяют решать актуальную задачу распознавания спорадических процессов в ионосфере, ответственных за экстремальные наземные возмущения электромагнитного поля. Соответствующие результаты имеют высокую прикладную ценность в промышленности, а именно в нефтегазовой, электроэнергетической и транспортной отраслях. Таким образом, решающую роль во всем спектре геомагнитных исследований играют расширение сети высокоточных магнитных обсерваторий и развитие спутниковых наблюдений. Обсерваторские данные при этом должны поставляться научному сообществу с минимальной задержкой по времени и иметь систематически высокое качество.

Представленные в статье результаты получены на основе данных, зарегистрированных на магнитных обсерваториях. Мы благодарим национальные институты, обеспечивающие их работоспособность, и ИНТЕРМАГНЕТ (<http://intermagnet.org>) за продвижение высоких стандартов в области геомагнитных наблюдений, а также Межрегиональный центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) за свободное распространение данных. Авторы также выражают благодарность международному проекту SuperMAG за свободное распространение данных мировой сети магнитовариационных станций (<https://supermag.jhuapl.edu/>) и проекту Swarm Европейского космического агентства за высокое качество спутниковых измерений МПЗ (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>). В работе использовались данные и сервисы ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/435997/>).

Исследования выполнены в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

Агаян С.М., Соловьев А.А., Богоутдинов Ш.Р., Николова Ю.И. Регрессионные производные и их применение в изучении геомагнитных джерков // Геомагнетизм и аэрономия, 2019, т. 59, № 3, с. 383—392, doi: 10.1134/S0016794019030027.

Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // Солнечно-земная физика, 2022, т. 8, № 2, с. 93—100, doi: 10.12737/szf-82202213.

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Физика Земли, 2018, № 4, с. 19—30.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, № 2 (16), с. 109—125.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Краснощёров Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Карапетян Д.К., Симонян А.О. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН, 2018, № 10, NZ4001, doi: 10.2205/2018NZ000357.

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьёв А.А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. М., РАН, 2019, 186 с.

Долгинов Ш.Ш., Наливайко В., Тюрмин А.В., Чинчевой М.М., Бродская Р.Е., Злобин Г.Н., Кикнадзе И.Н., Тюрмина Л.О. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-49». М., ИЗМИРАН, 1967, 3 т.

Долгинов Ш.Ш., Козлов А.Н., Колесова В.И., Косачева В.П., Наливайко В.И., Струнников Л.В., Тюрмин А.В., Тюрмина Л.О., Фастовский У.В., Черевко Т.Н., Алексахин Е.П., Вельчинская А.С., Гаврилов Е.А., Покрас В.И., Синицын В.И., Яговкин А.Р. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-321». М., Наука, 1976, 179 с.

Журавель В.П. Петербургский Международный экономический форум (ПМЭФ-2022) и его арктическая повестка // Арктика и Север, 2022, № 48, с. 244—260, doi: 10.37482/issn2221-2698.2022.48.244.

Кудин Д.В., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., Легостаева О.В. Система ускоренной подготовки квазиокончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ // Геомагнетизм и аэрономия, 2021, т. 61, № 1, с. 46—59, doi: 10.31857/S0016794021010090.

Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы Земли и ее связь с космической погодой // Солнечно-земная физика, 2020, т. 6, № 1, с. 51—62, doi: 10.12737/szf-61202005.

Пилипенко В.А., Красноперов Р.И., Соловьев А.А. Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России // Вестник ОНЗ РАН, 2019, т. 11, NZ1103, doi: 10.2205/2019NZ000362.

Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А., Ягова Н.В., Сахаров Я.А., Кудин Д.В., Костарев Д.В., Козырева О.В., Воробьев А.В., Белов А.В. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах // Russian J. Earth Sci., 2023, т. 23, doi: 10.2205/2023ES000824.

Розенберг И.Н., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Воронин В.А., Пилипенко В.А. Влияние космической погоды на надежность функционирования железнодорожного транспорта в Арктической зоне России // Железнодорожный транспорт, 2021, № 12, с. 20—26.

Соловьев А.А. Методы геоинформатики и нечеткой математики в анализе геофизических данных // Чебышевский сборник, 2018, т. 19, № 4, с. 194—214, doi: 10.22405/2226-8383-2018-19-4-194-214.

Соловьев А.А., Смирнов А.Г. Оценка точности современных моделей главного магнитного поля Земли с использованием ДМА-методов распознавания пониженной геомагнитной активности по данным геомагнитных обсерваторий // Физика Земли, 2018, № 6, с. 72—86, doi: 10.1134/S0002333718060108.

Соловьев А.А., Кудин Д.В., Сидоров Р.В., Котиков А.Л. Детектирование геомагнитного джерка 2020 г. по оперативным данным магнитных обсерваторий «Санкт-Петербург» и «Климовская» // ДАН, 2022а, т. 507, № 1, с. 85—90.

Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Ощенко А.А., Зайцев А.Н. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в Российской Арктике // Физика Земли, 2022б, № 3, с. 136—152, doi: 10.31857/S0002333722020120.

Чинкин В.Е., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным // Геомагнетизм и аэрономия, 2020, т. 60, № 5, с. 588—599, doi: 10.31857/S001679402005003X.

Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Krasnoperov R.I. Short introduction into DMA // Russ. J. Earth Sci., 2018, v. 18, ES2001, doi: 10.2205/2018ES000618.

Alken P., Maus S., Lühr H., Redmon R.J., Rich F., Bowman B., O'Malley S.M. Geomagnetic main field modeling with DMSP // J. Geophys. Res. A: Space Phys., 2014, v. 119, p. 4010—4025, doi: 10.1002/2013JA019754.

Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space, 2021, v. 73 (1), art. No. 49, doi: 10.1186/s40623-020-01288-x.

Aubert J., Finlay C.C. Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface // Nat. Geosci., 2019, v. 12 (5), p. 393—398.

Bartels J., Heck N.H., Johnston H.F. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity // J. Geophys. Res., 1939, v. 44 (4), p. 411—454.

Cain J.C., Hendricks S.J., Langel R.A., Hudson W.V. A proposed model for the International Geomagnetic Reference Field-1965 // J. Geomagn. Geoelec., 1967, v. 19 (4), p. 335—355.

Chinkin V.E., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Sakharov Ya.A. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2021, v. 212, art. No 105514, doi: 10.1016/j.jastp.2020.105514.

Chulliat A., Maus S. Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // J. Geophys. Res. B: Solid Earth, 2014, v. 119 (3), p. 1531—1543, doi: 10.1002/2013JB010604.

Chulliat A., Alken P., Maus S. Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core // Geophys. Res. Lett., 2015, v. 42, p. 3321—3329, doi: 10.1002/2015GL064067.

Chulliat A., Vigneron P., Hulot G. First results from the Swarm Dedicated Ionospheric Field Inversion chain // Earth Planets Space, 2016, v. 68 (1), p. 1—18.

- Colomb F.R., Alonso C., Hofmann C., Nollmann I.** SAC-C mission, an example of international cooperation // *Adv. Space Res.*, 2004, v. 34 (10), p. 2194—2199, doi: 10.1016/j.asr.2003.10.039.
- Connors M., Rostoker G., Sofko G., McPherron R.L., Henderson M.G.** Ps 6 disturbances: Relation to substorms and the auroral oval // *Ann. Geophys.*, 2003, v. 21, p. 493—508.
- Courtillot V., Ducruix J., Le Mouél J.L.** Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre // *C. R. Acad. Sci. D*, 1978, v. 287, p. 1095—1098.
- Finlay C.C., Olsen N., Toffner-Clausen L.** DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // *Earth Planets Space*, 2015, v. 67, art. No. 1, doi: 10.1186/s40623-015-0274-3.
- Finlay C.C., Kloss C., Olsen N., Hammer M.D., Toffner-Clausen L., Grayver A., Kuvshinov A.** The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly // *Earth Planets Space*, 2020, v. 72, art. No. 156, doi: 10.1186/s40623-020-01252-9.
- Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G.** *Swarm*: A constellation to study the Earth's magnetic field // *Earth Planets Space*, 2006, v. 58, p. 351—358.
- Glassmeier K.-H.** Traveling magnetospheric convection twin-vortices: Observations and theory // *Ann. Geophys.*, 1992, v. 10 (8), p. 547—565.
- Gvishiani A., Soloviev A.** Observations, modeling and systems analysis in geomagnetic data interpretation. Springer International Publishing, 2020, 311 p., doi: 10.1007/978-3-030-58969-1.
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.** Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment // *Data Sci. J.*, 2016, v. 15, art. No. 18, doi: 10.5334/dsj-2016-018.
- Jackson J.E., Vette J.I.** OGO program summary // NASA Technical Reports Server (NTRS), 1975, SP-7601.
- Johnston H.F.** Mean *K*-indices from twenty-one magnetic observatories and five quiet and five disturbed days for 1942 // *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, 1943, v. 48 (4), p. 219—227, doi: 10.1029/TE048i004p00219.
- Kataoka R., Fukunishi H., Lanzerotti L.J., Rosenberg T.J., Weatherwax A.T., Engebretson M.J., Watermann J.** Traveling convection vortices induced by solar wind tangential discontinuities // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107 (A12), 1455, doi: 10.1029/2002JA009459.
- Khokhlov A., Krasnoperov R., Nikolov B., Nikolova J., Dobrovolsky M., Petrov V., Kudin D., Belov I.** On the directions and structure of the short-term magnetic variations // *Russ. J. Earth Sci.*, 2019, v. 19, ES2002, doi: 10.2205/2019ES000656.
- Khomutov S.Y.** International project INTERMAGNET and magnetic observatories of Russia: cooperation and progress // *E3S Web Conf.*, 2018, v. 62 (02008), p. 1—11, doi: 10.1051/e3sconf/20186202008.
- Krasnoperov R., Peregoudov D., Lukianova R., Soloviev A., Dzeboev B.** Early Soviet satellite magnetic field measurements in the years 1964 and 1970 // *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, v. 12, p. 555—561.
- Lesur V., Gillet N., Hammer M.D., Manda M.** Rapid variations of Earth's core magnetic field // *Surv. Geophys.*, 2022, v. 43, p. 41—69, doi: 10.1007/s10712-021-09662-4.
- Love J.J., Chulliat A.** An international network of magnetic observatories // *EOS Trans. AGU*, 2013, v. 94 (42), p. 373—374, doi: 10.1002/2013EO420001.
- Lukianova R.Yu., Bogoutdinov Sh.R.** Statistical maps of field-aligned currents inferred from *Swarm*: dependence on season and interplanetary magnetic field // *Russ. J. Earth Sci.*, 2018, v. 18, ES6007, doi: 10.2205/2018ES000640.
- Lukianova R., Christiansen F.** Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents // *J. Geophys. Res.*, 2006, v. 111 (A3), doi: 10.1029/2005JA011465.
- Malik T.** SpaceX says a geomagnetic storm just doomed 40 Starlink internet satellites [Space.com], 2022, <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites-lost-geomagnetic-storm>.
- Manda M.** Magnetic satellite missions: where have we been and where are we going? // *C.R. Geosci.*, 2006, v. 338 (14—15), p. 1002—1011, doi: 10.1016/j.crte.2006.05.011.
- Manda M., Holme R., Pais A., Pinheiro K., Jackson A., Verbanac G.** Geomagnetic jerks: rapid core field variations and core dynamics // *Space Sci. Rev.*, 2010, v. 155, p. 147—175, doi: 10.1007/s11214-010-9663-x.
- Neubert T., Manda M., Hulot G., von Frese R., Prindahl F., Jørgensen J.L., Friis-Christensen E., Stauning P., Olsen N., Risbo T.** Ørsted satellite captures high-precision geomagnetic field data // *EOS Trans. AGU*, 2001, v. 82 (7), p. 81—88, doi: 10.1029/01EO00043.
- Newell P.T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E.J.** OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*, 2014, v. 12 (6), p. 368—379, doi: 10.1002/2014sw001056.
- Olsen N., Hulot G., Sabaka T.J.** Measuring the Earth's magnetic field from space: concepts of past, present and future missions // *Space Sci. Rev.*, 2010, v. 155, p. 65—93, doi: 10.1007/s11214-010-9676-5.

Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Campuzano S.A., Torta J.M. Signs of a new geomagnetic jerk between 2019 and 2020 from *Swarm* and observatory data // *Earth Planets Space*, 2021, v. 73, art. No. 1, doi: 10.1186/s40623-021-01504-2.

Poedjono B., Beck N., Buchanan A.C., Borri L., Maus S., Finn C., Worthington E.W., White T. Improved geomagnetic referencing in the Arctic environment // *SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*, 2013, SPE-166850-MS, doi: 10.2118/166850-MS.

Reigber Ch., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Adv. Space Res.*, 2002, v. 30 (2), p. 129—134, doi: 10.1016/S0273-1177(02)00276-4.

Reshetnyak M.Yu. Inverse problem for the Earth's core evolution model // *Russ. J. Earth Sci.*, 2020, v. 20, ES5007, doi: 10.2205/2020ES000740.

Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., Krasnoperov R. Historical *K* index data collection of Soviet magnetic observatories, 1957–1992 // *Earth Syst. Sci. Data*, 2021, v. 13 (5), p. 1987—1999, doi: 10.5194/essd-13-1987-2021.

Skuridin G.A. Mastery of outer space in the USSR, 1957–1967 (translation of “Osvoenie kosmicheskogo prostranstva v SSSR, 1957–1967.” Moscow, Nauka, 1971, 554 p.) (NASA-TT-F-16516). Karachi (Pakistan), Saad Publ., 1975, 1291 p.

Soloviev A.A., Peregoudov D.V. Verification of the geomagnetic field models using historical satellite measurements obtained in 1964 and 1970 // *Earth Planets Space*, 2022, v. 74 (1), art. No. 187, doi: 10.1186/s40623-022-01749-5.

Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S. Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // *Ann. Geophys.*, 2016, v. 59 (6), G0653, doi: 10.4401/ag-7116.

Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S. Detection of secular acceleration pulses from magnetic observatory data // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2017, v. 270, p. 128—142, doi: 10.1016/j.pepi.2017.07.005.

Soloviev A., Sidorov R., Grudnev A., Khokhlov A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sapunov V., Tzetlin A., Semenov A. Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory White Sea (IAGA code: WSE) // *ESDB Repository*, 2019a, <http://geomag.gcras.ru/dataproduct-down.html>, doi: 10.2205/WSE-database.

Soloviev A., Smirnov A., Gvishiani A., Karapetyan J., Simonyan A. Quantification of *Sq* parameters in 2008 based on geomagnetic observatory data // *Adv. Space Res.*, 2019b, v. 64 (11), p. 2305—2320, doi: 10.1016/j.asr.2019.08.038.

Soloviev A., Bogoutdinov S., Nisilevich M. On the frequency distribution of geomagnetic *K* indices in the northwestern Pacific region over the 19–24 solar cycles // *Pure Appl. Geophys.*, 2021, v. 179 (4), doi: 10.1007/s00024-021-02862-4.

Stern D.P., Bredekamp J.H. Error enhancement in geomagnetic models derived from scalar data // *J. Geophys. Res.*, 1975, v. 80, p. 1776—1782.

Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeve G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // *Russ. J. Earth Sci.*, 2020, v. 20, ES6001, doi: 10.2205/2020ES000721.

Yamazaki Y. Solar and lunar daily geomagnetic variations and their equivalent current systems observed by *Swarm* // *Earth Planets Space*, 2022, v. 74, art. No. 99, doi: 10.1186/s40623-022-01656-9.

Yamazaki Y., Maute A. *Sq* and *EEJ*—A review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents // *Space Sci. Rev.*, 2017, v. 206 (1—4), p. 299—405, doi: 10.1007/s11214-016-0282-z.