

Российская академия наук  
Геофизическая обсерватория «Борок» –  
филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

# **СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОБСЕРВАТОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

**МАТЕРИАЛЫ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,**

посвященной

100-летию со дня рождения Валерии Алексеевны Троицкой  
и 60-летию Геофизической обсерватории «Борок»

БОРОК  
16–19 ОКТЯБРЯ 2017 Г.

Ярославль  
2017

УДК 550.3  
ББК 26.2  
С 75

**С 75 Среднеширотные геофизические обсерваторские наблюдения :** материалы научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Валерии Алексеевны Троицкой и 60-летию Геофизической обсерватории «Борок» / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН – Ярославль : Филлигрань, 2017. – 66 с.

ISBN 978-5-906682-98-7

Ответственный редактор:  
д.ф.-м.н. *С. В. Анисимов*

В сборнике материалов Научно-практической конференции «Среднеширотные геофизические обсерваторские наблюдения», посвященной 100-летию со дня рождения Валерии Алексеевны Троицкой и 60-летию Геофизической обсерватории «Борок», представлены доклады, отражающие достижения Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН, а также работы коллег и учеников В. А. Троицкой, исследователей, участвовавших в создании обсерватории и сотрудничающих с ней. Для ученых, работающих в области геоэлектромагнетизма, палеомагнетизма, сейсмологии, наблюдательной, теоретической и экспериментальной геофизики, преподавателей и студентов вузов.

Проведение конференции и издание материалов осуществлено при финансовой поддержке РФФИ, ФАНО, ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

УДК 550.3

ББК 26.2

**ISBN 978-5-906682-98-7**

© ГО «Борок» ИФЗ РАН  
макет, оформление, верстка, 2017  
© Коллектив авторов, текст

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

1. Анисимов С. В., д.ф.-м.н., ГО «Борок» ИФЗ РАН, Борок (сопредседатель);
2. Похотелов О. А., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва (сопредседатель);
3. Глико А. О., академик РАН, академик-секретарь ОНЗ РАН, Москва;
4. Бондур В. И., академик РАН, НИИ «АЭРОКОСМОС», Москва;
5. Гвишиани А. Д., академик РАН, ГЦ РАН, Москва;
6. Зелёный Л. М., академик РАН, ИКИ РАН, Москва;
7. Тихоцкий С. А., чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН, Москва;
8. Морозов Ю. А., чл.-корр. РАН, ИФЗ РАН, Москва;
9. Мареев Е. А., чл.-корр. РАН, ИПФ РАН, Н. Новгород;
10. Пономарёв А. В., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
11. Гохберг М. Б., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
12. Гульельми А. В., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
13. Клейменова Н. Г., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
14. Павлов В. Э., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
15. Пилипенко В. А., д.ф.-м.н., ИФЗ РАН, Москва;
16. Щербаков В. П., д.ф.-м.н., ГО «Борок» ИФЗ РАН, Борок.

Конференция организована при финансовой поддержке  
РФФИ, ФАНО, ИФЗ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН

## **ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «БОРОК»: 60 ЛЕТ НА РУБЕЖАХ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ**

Геофизическая обсерватория «Борок» ([www.brk.adm.yar.ru](http://www.brk.adm.yar.ru)) — единственная в Европейской части России среднеширотная геофизическая обсерватория, ведущая с момента открытия в 1957 году натурные наблюдения и фундаментальные исследования естественных геофизических полей. Создание и развитие Обсерватории связаны с именем Валерии Алексеевны Троицкой (15.11.1917–21.01.2010) — выдающегося ученого-геофизика, родоначальника изучения геомагнитных пульсаций, организатора российского сектора международной сети геомагнитных наблюдений, инициатора создания магнитной станции «Борок» в рамках проведения Международного геофизического года (1957–1958 гг.).

За 60 лет своей истории Обсерватория стала крупным научным учреждением, неотъемлемой частью ведущего геофизического центра страны — Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук ([www.ifz.ru](http://www.ifz.ru)). В Геофизической обсерватории «Борок» осуществлены пионерские исследования в области диагностики состояния магнитосферы и солнечного ветра по результатам наземных наблюдений геомагнитных пульсаций, разработаны надёжные методы реконструкции древнего магнитного поля по результатам лабораторных исследований магнитных свойств образцов горных пород. Достаточно сказать, что сотрудниками Обсерватории получено более половины мировых палеомагнитных данных о величине древнего магнитного поля Земли. Обсерватория занимает лидирующие позиции в изучении атмосферного электричества, развитии методов наблюдений и численного моделирования электрического состояния нижней атмосферы.

С годами возрастает научная и практическая ценность проводимых в Обсерватории геофизических наблюдений, что обусловлено как уникальностью информационно-измерительного комплекса, так и удаленным от мегаполисов местоположением Обсерватории. Значимое направление работ Обсерватории в последние годы связано с петрофизическими исследованиями и нефтегазовой разведочной геофизикой. 60-летний юбилей Обсерватория встречает как компетентный, профессиональный, преданный своему делу коллектив, способный успешно решать востребованные задачи современной фундаментальной и прикладной геофизики.

Директор ГО «Борок» ИФЗ РАН,  
доктор физ.-мат. наук  
Сергей Васильевич Анисимов  
телефон/факс: 8 (48547) 24024  
e-mail: [director@borok.yar.ru](mailto:director@borok.yar.ru)

## **НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ В. А. ТРОИЦКОЙ**

## **В. А. Троицкая — удивительная и отважная женщина и ученый**

*Н. Г. Клейменова*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Роль личности в развитии науки, как и в истории, очень важна. Будет приведена биография и некоторые факты важных событий в жизни Валерии Алексеевны Троицкой — этой необыкновенной, прекрасной и отважной женщины, которая прожила удивительную жизнь, полную ярких, а иногда и драматических эпизодов. Она всегда умела принимать нестандартные и порою рискованные решения вопреки законам общества того времени. Её любимый девиз: «Нам жизнь предлагает, а мы выбираем» помогал сделать правильный выбор в сложившейся ситуации. Она считала, что главным в жизни являются человеческие отношения, нужны годы, чтобы их сформировать и мгновения, чтобы разрушить. Показана ведущая роль личности В. А. Троицкой в создании серии новых станций земных токов во время Международного геофизического года, в организации последующих комплексных наблюдений в Борке и превращении его в научный центр мировой известности. Только благодаря активным действиям и авторитету В. А. Троицкой стало возможным проведение международных синхронных геомагнитных наблюдений в сопряженных точках Согра-Кергелен, а также на геомагнитных полюсах Восток-Туле. Огромная роль В. А. Троицкой была в развитии международного научного сотрудничества в области геофизики. В 1970–1980 годы, когда советские ученые практически не могли печатать свои статьи в зарубежных журналах и принимать участия в международных конференциях, В.А. Троицкая сделала очень многое для открытия «железного занавеса» для советской науки. Она организовала приезд в Москву и Борок ряда ведущих зарубежных ученых и проведение там нескольких крупных международных научных конференций, в которых смогли принять активное участие советские ученые. Со своими учениками В.А. Троицкая опубликовала около 200 работ, причем многие из них в зарубежных изданиях, что позволило ознакомить широкую мировую научную общественность с результатами, полученными в России. Американские коллеги называли её «королевой геомагнитных пульсаций». О большом международном авторитете В. А. Троицкой свидетельствует тот факт, что её дважды избирали Президентом МАГА — крупной международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии. Сама увлеченная наукой и великая труженица. Все, как советские, так и иностранные коллеги всегда восхищались её доброжелательностью, жизнерадостностью, умом, энтузиазмом и необыкновенным организационным талантом.

## В. А. Троицкая и Борок — создатели науки о геомагнитных пульсациях

*Н. Г. Клейменова*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Известно, что в физике магнитосферы важную роль играют волновые явления. Исследование короткопериодных колебаний в магнитном поле Земли как фундаментального естественного процесса магнитосферной плазмы началось с открытия В. А. Троицкой двух колебательных режимов в геомагнитном поле: непрерывного ( $Pc$ ) и иррегулярного ( $Pi$ ). Для изучения этих колебаний по её инициативе во время Международного геофизического года (МГГ, 1957–1959 гг) было организовано около 20 новых станций земных токов, одна из которых была Борок. Впоследствии Борок стал базовым пунктом исследования геомагнитных пульсаций. Здесь В. А. Троицкой был создан сплочённый коллектив молодых энтузиастов, успешно развивалось сотрудничество со многими научными организациями в России и за рубежом. Так, Борок стал головным центром по изучению короткопериодных колебаний в магнитном поле Земли. Именно в Борке были установлены основные фундаментальные закономерности разных типов геомагнитных пульсаций:  $Pc3$  (О. В. Большакова),  $Pi2$  (Р. В. Щепетнов),  $Pc1$  (Э. Т. Матвеева) и др. Первые советско-французские наблюдения в сопряженных точках Согра-Кергелен сначала были опробованы в обсерватории Борок, где и было обнаружено, что в отличие от других видов пульсаций волновые пакеты  $Pc1$  в северном и южном полушариях регистрируются попеременно, а не одновременно. На основе исследований, проведенных в Борке, было создано новое направление в геофизике — диагностика состояния магнитосферы на основе наземных наблюдений геомагнитных пульсаций (А. В. Гульельми). В Борке впервые был проведен анализ одновременных наблюдений геомагнитных пульсаций в полярных широтах Арктики и Антарктики и установлены главные закономерности волновых явлений на геомагнитных полюсах, а также вблизи проекции дневного полярного каспа (О. В. Большакова). Таким образом, В. А. Троицкой и сотрудниками обсерватории Борок были установлены главные закономерности колебательных режимов в геомагнитном поле Земли, т. е. создан фундамент для дальнейших как экспериментальных, так и теоретических исследований. Это позволило понять ключевую роль волн в динамике магнитосферной плазмы.

## **В. А. Троицкая и ультранизкочастотные волны**

*А. В. Гульельми*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Прошло сто лет со дня рождения выдающегося ученого профессора В. А. Троицкой. Этому событию посвящена данная работа. В ней изложен ряд научных достижений В. А. Троицкой в исследовании ультранизкочастотных колебаний электромагнитного поля Земли. Рассказано о перманентных и спорадических колебаниях, об «ожерельях жемчужин», о колебаниях нарастающей частоты, о колебаниях в Арктике и в Антарктиде. Описано современное состояние проблематики, которая в свое время волновала В. А. Троицкую. Особое внимание уделено ключевой роли межпланетного магнитного поля в формировании пространственно-временной структуры колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе 15 Президиума РАН и РФФИ (гранты № 16-05-00056 и № 16-05-00631).



## Триггеры УНЧ излучений: К столетию В. А. Троицкой

*А. В. Гудельми*<sup>1</sup>, *Б. В. Довбня*<sup>2</sup>, *О. Д. Зотов*<sup>2</sup>, *Б. И. Клайн*<sup>2</sup>, *А. С. Потапов*<sup>3</sup>,  
*В. Ф. Рубан*<sup>4</sup>, *И. В. Стерликова*<sup>5</sup>, *И. П. Лаверов*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>3</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>4</sup> Филиал ОАНО Московского психолого-социального университета, Муром

<sup>5</sup> Страховой документальный фонд, Филиал Архива РАН, Ярославская обл., Борок

Работа посвящена памяти профессора Валерии Алексеевны Троицкой (1917–2010). Представлен один из аспектов ее многогранной творческой активности, а именно, исследование триггерных явлений в магнитосфере на материале наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний.

Интересный эффект наблюдается иногда во время регистрации одной из разновидностей колебаний Pc1 (диапазон частот 0.2–5 Гц) [1]; вслед за В. А. Троицкой их называют «жемчужинами» за правильную форму этих колебаний на осциллограммах. Жемчужины возбуждаются и распространяются в магнитосферно-ионосферной системе. Но оказалось, что режим возбуждения и/или распространения жемчужин может откликаться на метки точного времени [2]: иногда в момент начала часа процесс генерации жемчужин запускается или, наоборот, прекращается. Интересно, что тот же эффект проявляется и для другого типа колебаний Pc1 — собственных осцилляций так называемого ионосферного альвеновского резонатора [3]. По-видимому, триггерами Pc1 являются электромагнитные импульсы из техносферы, а часовые метки являются своего рода тактовыми сигналами, глобально синхронизирующими работу технологических систем. Часовые пульсации индустриальной активности человечества действительно существуют, были обнаружены напрямую и описаны в работе [4]. Они создаются спонтанно многими миллионами потребителей энергии, живущими по часам и неосознанно формирующими эффект часовых меток в техносфере.

Другим триггером УНЧ колебаний, на этот раз естественного происхождения, является процесс переориентации форшока — турбулизованной области перед фронтом околосемной ударной волны. Ориентация форшока определяется направлением межпланетного магнитного поля (ММП). Так, от направления вектора ММП в плоскости XZ, которое описывается знаком произведения  $\sigma = B_x \times B_z$ , зависит то, где находится более активная часть форшока — выше (при  $\sigma > 0$ ) или ниже (при  $\sigma < 0$ ) плоскости геомагнитного экватора [5]. Можно ожидать, что и различного рода колебания, возбуждаемые в области форшока, будут чаще наблюдаться (либо их амплитуда будет больше) в северном или южном полушарии земной магнитосферы в зависимости от знака  $\sigma$ . И действительно, по крайней мере для двух типов

осцилляций, РС1 и дискретных сигналов, такая зависимость подтверждается наблюдениями.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 16-05-00056 и 16-05-00631, а также программ 7 и 15 Президиума РАН.

### **Литература**

1. *Троицкая В. А.* Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомagnetизм и аэрономия. 1964. Т. 4. № 3. С. 615–616.
2. *Гульельми А. В., Довбня Б. В., Клайн Б. И., Пархомов В. А.* Стимулированное возбуждение альвеновских волн импульсным радиоизлучением // Геомagnetизм и аэрономия. 1978. Т. 18. N 1. С. 179–181.
3. *Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю.* Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. С. 840–843.
4. *Гульельми А. В., Зотов О. Д.* Явление синхронизма в динамической системе магнитосфера-техносфера-литосфера // Физика Земли. 2012. № 6. С. 23–33.
5. *Гульельми А. В., Потапов А. С.* Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ колебания ионосферного резонатора // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 4. С. 263–267.

## Эффект Троицкой-Большаковой: роль альвеновской турбулентности солнечного ветра

*А. С. Потапов*<sup>1</sup>, *Т. Н. Полошкина*<sup>1</sup>, *А. В. Гутьельми*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

В конце 1960-х годов В. А. Троицкая и О. В. Большакова обнаружили интересный эффект воздействия ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) на амплитудный режим дневных устойчивых геомагнитных пульсаций Pc3 [1]. Ими было показано, что пульсации исчезают при отклонении вектора ММП от линии Солнце-Земля на угол, близкий к 90°. Позднее найденный эффект был интерпретирован [2] в рамках гипотезы о возбуждении пульсаций Pc3 перед фронтом околоземной ударной волны за счет неустойчивости потока отраженных от фронта ионов [3]. Возбуждаемые отраженными ионами волны сносятся солнечным ветром на ударный фронт и проникают в магнитосферу, вызывая колебания геомагнитного поля, регистрируемые на земле в виде пульсаций Pc3. Этот механизм перестает работать, когда силовые линии ММП выстилаются вдоль поверхности ударного фронта.

В межпланетной плазме существуют неоднородности, турбулентность, волны различной частоты, которые могут приводить к значительным вариациям направления вектора ММП, в том числе и к его развороту перпендикулярно потоку солнечного ветра.

В данной работе мы пытаемся найти прямые свидетельства связи вариаций амплитуды Pc3 с МГД-волнами в солнечном ветре, в первую очередь с альвеновскими волнами, которые вызывают изменения ориентации вектора ММП. На примере двух десятков 6-часовых интервалов наблюдения геомагнитных пульсаций типа Pc3 продемонстрировано воздействие изменений направления ММП на амплитуду пульсаций (эффект Троицкой-Большаковой). Показано, что источником изменений конусного угла ММП часто являются альвеновские волны, распространяющиеся в солнечном ветре. Для анализа привлекались измерения геомагнитных пульсаций на среднеширотной обсерватории Узур и на трех космических аппаратах за пределами околоземной ударной волны.

Результаты свидетельствуют, что влияние оказывают лишь волны с периодом более 40–60 мин в неподвижной относительно Земли системе координат. Альвеновская турбулентность более высокой частоты некогерентна, колебания несут хаотический характер, не согласованный по амплитуде и фазе ни между спутниками, ни с вариациями амплитуды Pc3. В отдельных случаях модуляция амплитуды пульсаций оказывается связанной с прохождением границы сектора ММП. Оценка направления распространения альвеновских волн показала, что преимущественно они распространяются от

Солнца, но нормали волновых фронтов могут отклоняться от линии Солнце-Земля. Приведена статистика основных свойств колебательных структур в межпланетной среде, обнаруженных нами в период наблюдений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 16-05-00056 и 16-05-00631, а также программ 7 и 15 Президиума РАН.

### **Литература**

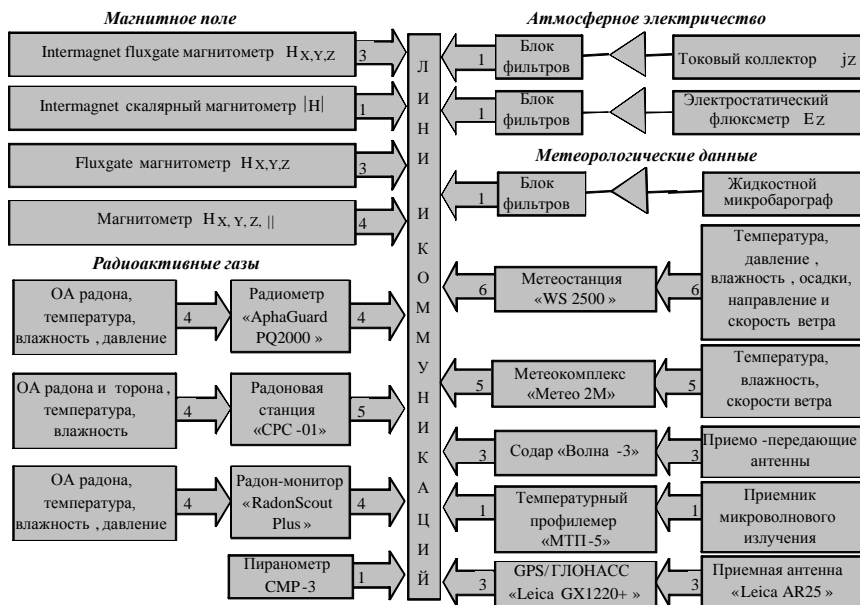
1. *Большакова О. В., Троицкая В. А.* Связь направления межпланетного магнитного поля с режимом устойчивых колебаний // Доклады АН СССР. 1968. Т. 180. № 2. С. 343–346.
2. *Большакова О. В., Троицкая В. А., Русакова Т. Б.* Контроль межпланетным магнитным полем пульсаций Pс3 в солнечном ветре и на земле // Геомагнетизм и аэрномия. 1987. Т. 27. № 2. С. 345–346.
3. *Гульельми А. В., Троицкая В. А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // М.: Наука. 1973. – 208 с.

## **СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

## Информационно-измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН: состояние и перспективы

*С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев, Э. М. Дмитриев*  
 Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

На Геофизической обсерватории «Борок» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ГО «Борок» ИФЗ РАН) непрерывно регистрируются как геомагнитные, так и аэроэлектрические, аэрофизические и метеорологические поля (рис. 1). Низкий уровень сейсмических и электромагнитных шумов в районе расположения ГО «Борок» [58° 04' N; 38° 14' E], отсутствие источников техногенных загрязнений, позволяют использовать данные наблюдений в исследованиях естественных геофизических процессов [1–3].



**Рис. 1.** Информационно-измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН.

Геомагнитные наблюдения охватывают регистрацию компонент геомагнитного поля и его полного вектора (магнитометры международной сети INTERMAGNET), вариаций геомагнитного поля (трехкомпонентный fluxgate-магнитометр), УНЧ пульсаций геомагнитного поля (индукционные магнитометры), а также регулярное проведение абсолютных магнитных измерений.

Аэроэлектрические наблюдения включают измерения плотности вертикального электрического тока атмосферы (антенна «токовый коллектор») и вертикального электрического поля (электростатический флюксметр).

Объемная активность (ОА) радиоактивных газов измеряется сейсмической радоновой станцией «СРС-01» (ОА  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  в почвенном воздухе), радиометрами «AlphaGuard PQ2000» (вариации ОА  $^{222}\text{Rn}$  в приземной атмосфере) и «Radon Scout Plus» (среднесуточные значения ОА  $^{222}\text{Rn}$  в помещении).

Метеонаблюдения ведутся при помощи цифровой метеостанции «WS-2500». Пульсации температуры воздуха и скорости ветра, а также относительная влажность воздуха и атмосферное давление, измеряются цифровым ультразвуковым метеокомплексом «Метео-2М».

Метеорологический доплеровский акустический локатор (содар) «Волна-3» измеряет вертикальные профили трех компонент скорости ветра до высот 300 – 800 м. Метеорологический температурный профилемер «МТП-5» определяет высотные профили температуры нижней атмосферы до высот 1000 м.

Геодезический двухчастотный GPS/ГЛОНАСС приемник Leica GX1220+ предназначен для проведения высокоточных геодезических измерений и оперативной оценки полного электронного содержания ионосферы.

В измерительный комплекс входят также пиранометр «СМР-3» для измерения полной плотности потока солнечного излучения и высокоточный жидкостной микробарограф для регистрации инфразвуковых вариаций давления.

Наблюдаемые геофизические поля регистрируются компьютерами сбора данных и через локальную сеть сбора данных поступают в базу данных ГО «Борок» ИФЗ РАН. Доступ к ней осуществляется через интернет-ресурс по направлению глобальной электрической цепи, аэроэлектричества и геомагнетизма ([geodata.borok.ru](http://geodata.borok.ru)). В настоящее время наряду с данными цифровой регистрации (с 1998 г.) база данных пополняется результатами оцифровки бумажных регистрограмм аэроэлектрического поля и тока (с 1988 г.), что позволит изучать длиннопериодные колебания и тренды в их вариациях.

Работа по развитию измерительного комплекса и базы данных ГО «Борок» ИФЗ РАН ведется при поддержке РФФИ (гранты №№ 15-05-04960 и 16-07-01242).

### Литература

1. Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Дмитриев Э.М., Прохорчук А.А. База данных Геофизической обсерватории «Борок» для аэроэлектрических исследований // Мат-лы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 28 октября – 01 ноября 2013. ГО «Борок» ИФЗ РАН, Ярославль. 2013. С. 82–83.
2. Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Аэроэлектрические и аэрофизические наблюдения на геофизической обсерватории «Борок» // Мат-лы 2-й Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 5 – 9 октября 2015. ГО «Борок» ИФЗ РАН, Ярославль. 2015. С. 98–99.
3. Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Обсерваторские аэроэлектрические и аэрофизические наблюдения на геофизической обсерватории «Борок» // Мат-лы 3-й Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 25–29 сентября 2017. ГО «Борок» ИФЗ РАН, Ярославль. 2017. С. 96–97.

## Система контроля кольцевого тока по данным магнитных обсерваторий России

*А. Н. Зайцев, В. Г. Петров, В. В. Мединский*

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва

Анализ возмущений магнитного поля на поверхности Земли в средних широтах позволяет оценить сложную динамику токовых систем магнитосферного и ионосферного происхождения, развивающихся в периоды магнитных бурь. Для описания характеристик магнитных бурь по наземным данным вычисляется Dst-вариация, которая представляет собой сумму токовых систем  $Dst = DCF + DR$ , где DCF — поле токов на поверхности магнитосферы и DR — поле кольцевых токов внутри магнитосферы. От этой простой схемы в настоящее время сделан переход к более детальному описанию поля возмущений в период магнитных бурь. Показано что в вариациях H-компоненты магнитного поля, наблюдаемых на среднеширотных станциях, проявляются эффекты нескольких токовых систем, в том числе  $H = H(SQ) + H(DCF) + H(SYM) + H(ASY) + H(T) + H(SUB)$ , где H(SQ) — поле спокойных солнечно-суточных вариаций, H(DCF) — поле токов на магнитопаузе, H(SYM) — поле симметричного кольцевого тока, H(ASY) — поле асимметричного кольцевого тока, H(T) — поле токов в хвосте магнитосферы, H(SUB) — поле токовой системы полярных возмущений.

Ключевой задачей при наблюдениях вариаций магнитного поля Земли в реальном времени является прогноз космической погоды. Таким образом актуальной является задача определения характеристик токовых систем по наземным данным. Ввиду того, что территория России охватывает более 12 часовых поясов имеется возможность детальной оценки характеристик магнитной возмущенности. После Международного геофизического года было предложено использовать среднеширотные обсерватории СССР для вычисления Dst-вариации. В настоящее время это предложение может быть реализовано на современном уровне ИТ-технологий. Предлагается использовать систему сбора данных в реальном времени и разработать методику анализа данных для вычисления параметров токовых систем, составляющих Dst-вариацию. В первую очередь речь идет о разделении полей токовых систем магнитосферного происхождения и токов ионосферного происхождения. Кольцевой ток порождает длительные вариации магнитосферного магнитного поля. Усиления токов хвоста магнитосферы приводят к интенсивным кратковременным вариациям магнитного поля, коррелирующим с индексом авроральной активности AE. Магнитное поле токов на магнитопаузе отражает мгновенные изменения в параметрах межпланетной среды.



## Наблюдения электрического поля на Камчатке 1997–2016 гг.

*С. Э. Смирнов*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
Камчатский край, Паратунка

Непрерывные обсерваторские наблюдения атмосферного электричества начались в конце 1996 г. Сейчас архив наблюдений составляет более 20 лет. Проведен анализ сезонного и векового хода аэроэлектрического поля среднеширотной обсерватории Паратунка на Камчатке за 1997–2016 гг.

В вариациях спектров мощности электрического поля обнаружен полный набор колебаний, совпадающих с периодами тепловых приливных волн (24, 16, 12, 8, 4 ч) и внутренних гравитационных волн (0,5–3 ч) в приземной атмосфере. В спектрах мощности суточных вариаций напряженности электрического поля обнаружены 2 полосы собственных колебаний атмосферы:  $T = 0,5\text{--}3$  ч и 4–24 ч, которые соответствуют модам внутренних гравитационных и тепловых приливных волн. Обнаружено, что в период подготовки землетрясения с аномалией в суточном ходе электрического поля интенсивность спектров в полосе периодов  $T = 0,5\text{--}3$  ч на порядок и более возрастала по сравнению со спектрами в спокойных метеорологических условиях, но была ниже на порядок по величине при наличии осадков [1–2].

По результатам регулярных наблюдений за сутки до землетрясения получены статистические распределения аномальных эффектов (величины и длительности аномалий) и их связь с магнитудой землетрясений и расстоянием до эпицентра. Показано, что даже в условиях «хорошей погоды» вероятность использования аномалий в электрическом поле в качестве возможного прогноза землетрясений составляет величину порядка 36 %. Было показано, что осадки вызывают аномальные эффекты во временных и спектральных вариациях электрического поля, которые подобны эффектам в период подготовки землетрясений, что существенно ограничивает использование аномальных эффектов электрического поля в качестве краткосрочного прогноза землетрясений [3].

Показано, что интенсивность максимумов спектральной плотности мощности электрического поля в дни с грозами в полосе периодов 0,5–3 ч на один – полтора порядка по величине превышает соответствующие максимумы накануне землетрясений, и на два порядка и более — в полосе периодов 5–30 мин.

При сильных солнечных вспышках и магнитной буре в спектрах мощности электрического поля преобладающим компонентом является  $T \sim 48$  ч, интенсивность которого возрастает на порядок по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды» [4].

### Литература

1. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В., Бузевич А. В., Смирнов С. Э. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 3. С. 750–758.
2. Mikhailov Y. M., Mikhailova G. A., Kapustina O. V., Buzevich A. V., Smirnov S. E. Power spectrum features of near-Earth atmospheric electric field in Kamchatka // Annals of Geophysics. 2004. V. 47, N. 1. P. 237–245.
3. Смирнов С. Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 2. С. 282–287.
4. Михайлова Г. А., Капустина О. В., Смирнов С. Э. Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях спектров мощности электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 5. С. 691–700.

## **Геофизический комплекс ИСЗФ СО РАН для мониторинга электромагнитных полей в высоких и средних широтах**

*Р. А. Рахматулин, Ю. В. Липко, А. Ю. Пашинин, В. М. Алешков*  
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук (Россия, г. Иркутск) располагает аппаратно-программным комплексом для мониторинга электромагнитных полей в высоких и средних широтах, который включает следующие пункты наблюдения:

1. Магнитная Обсерватория «Иркутск» основана в 1886 году, предназначена для экспериментального исследования магнитного поля Земли путем непрерывной трехкомпонентной регистрации, как его абсолютных значений, так и вариаций в частотном диапазоне от 0 до 5 Гц. Она оснащена магнитометрическими инструментами — феррозондовым деклинометром-инклинометром для измерения склонения и наклона, протонным магнитометром для измерения полного вектора, трехкомпонентным феррозондовым магнитометром Lemi-018 для регистрации вариаций H, D, Z компонент.

2. Норильская комплексная магнитно-ионосферная станция расположена на севере Красноярского края и функционирует с 1962 года. Эта станция института располагает обширным комплексом геофизической аппаратуры для проведения абсолютных и вариационных наблюдений магнитного поля Земли, включающим деклинометр-инклинометр, трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, протонный магнитометр. Регистрация геомагнитных пульсаций осуществляется индукционным нанотесламетром с дискретностью опроса каналов 64 Гц.

3. Байкальская магнитно-теллурическая обсерватория «Узур» расположена на острове Ольхон озера Байкал в 350 км от Иркутска, работает с 1962 года. Эта станция производит непрерывные круглосуточные круглогодичные наблюдения низкочастотных электрических полей (земные токи, 3 компоненты, частотный диапазон 0,001–10,0 Гц), трехкомпонентные измерения магнитных составляющих геомагнитных пульсаций (индукционный нанотесламетр, частотный диапазон 0,001–10,0 Гц).

4. Станция по регистрации геомагнитных пульсаций в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (ССО, Монды). Регистрация геомагнитных пульсаций осуществляется индукционным нанотесламетром Lemi-30 с дискретностью опроса каналов 64 Гц.

5. Магнитометрический комплекс ИСЗФ СО РАН располагает комплектом магнитоизмерительной аппаратуры для проведения измерений в полевых условиях.

## **Среднеширотные вариации параметров навигационных сигналов в периоды авроральной активности**

*С. А. Черноус<sup>1</sup>, И. И. Шагмуратов<sup>2</sup>, М. В. Филатов<sup>1</sup>, П. А. Будников<sup>3</sup>,  
И. И. Ефишов<sup>2</sup>, Н. Ю. Тепеницина<sup>2</sup>, В. В. Алпатов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Полярный геофизический институт, Мурманск

<sup>2</sup> Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград

<sup>3</sup> Институт прикладной геофизики Роскомгидромета, Москва

Целью доклада является описание проведенного экспериментального исследования взаимосвязи возмущений авроральной зоны и изменений в трансионосферных сигналах глобальных навигационных спутниковых сигналов (ГНСС) в средних широтах. Исходными данными работы послужили измерения параметров сигнала отдельных пролетов навигационных спутников и наблюдения авроральной активности. В исследовании задействованы данные приемников ГНСС, расположенных в широтном диапазоне 50–67 градусов широт на долготе ~ 20 градусов. Для каждого спутника рассчитывалась степень возмущения полного электронного содержания (ПЭС), степень изменчивости электронного содержания — индекс ROTI и индекс сцинтилляции по уровню принимаемого сигнала  $S_4$ . Одновременные наблюдения за сигналами ГНСС и авроральными возмущениями, проводились на станциях, расположенных приблизительно вдоль меридиана от Санкт-Петербурга до Тромсе. Подробно рассматривается большая магнитная буря 17–18 марта 2015 года, когда полярные сияния наблюдались до 55–60° географической широты (Москва, Санкт-Петербург и другие регионы России и Европы). Обнаружено сходство вариаций временных рядов развития активности авроральных суббурь и вариаций полного электронного содержания (ПЭС) на разных станциях. Интенсивность, как флуктуаций ПЭС, так и магнитных возмущений уменьшались по типу авроральной суббури при перемещении от северных станций к среднеширотным. Динамическое развитие этой бури в ПЭС по меридиональной цепочке с 58° до 70° демонстрирует авроральную природу вариаций ПЭС до ~ 60° N. Амплитуда вариаций ПЭС соответствует амплитуде вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля и положению южной границы аврорального овала. Степень изменчивости ПЭС уменьшается с увеличением расстояния между источником помех в полярной ионосфере (авроральными возмущениями) и приемником GPS. Анализируется состояние ионосферы по данным среднеширотных станций радиотомографии ФГБУ «ИПГ» Росгидромета за указанный период. В ходе анализа выявлена зависимость ошибок позиционирования от степени возмущенности ионосферы. Изображения пространственного распределения флуктуаций ПЭС (ROTI) в координатах CGL и MLT, построенные с помощью ежедневных измерений сигналов ГНСС на отдель-

ных станциях, демонстрируют пространственную структуру, сравнимую с моделью овала полярных сияний. Анализ показал, что флуктуации параметров сигналов ГНСС чувствительны к изменению условий космической погоды и уровень авроральной активности может быть использован для оценки качества приема сигнала ГНСС в случае интенсивных возмущений. Авторы считают, что полученные результаты указывают на то, что сбои в работе навигационных систем и большие погрешности позиционирования могут иметь место даже в средних широтах во время больших магнитных бурь при смещении аврорального овала к экватору.

Данное исследование поддержано грантом РФФИ 17-45-510341 и грантом Президиума РАН.

### **Литература**

1. Черноус С. А., Швец М. В., Филатов М. В., Шагмуратов И. И., Калитенков А. Н. Исследования особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10, С. 33–39.
2. Шагмуратов И. И., Черняк Ю. В., Захаренкова И. Е., Тепеницына Н. Ю., Радиевский А. В. Ефишов И. И., Якимова Г. А. Использование навигационной системы ГЛОНАСС для ионосферных исследований // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10, С. 25–32.
3. Алпатов В. В., Васильев А. Е., Будников П. А., Молодцов Д. А., Репин А. Ю. Новый инструмент мониторинга ионосферы – сеть радиотомографии // Практические аспекты гелиогеофизики – Материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе»: ИКИ РАН. 2016. С. 56–63.



## **МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

## Резонансные структуры в магнитосфере Земли

*Б. В. Довбня*<sup>1</sup>, *А. С. Потапов*<sup>2</sup>, *А. В. Гульельми*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Рассмотрены морфологические свойства ионосферного и магнитосферного резонаторов. Сообщается о новых результатах, полученных при исследовании колебаний Pc1 в ионосферном резонаторе на среднеширотной обсерватории Монды с марта 2010 по май 2011 года. Найденные взаимосвязи между вариациями резонансных частот колебаний с одной стороны, и вариациями критической частоты ионосферы  $f_0F_2$  с другой планируется использовать для поиска методов оценки таких ионосферных параметров, как электронная концентрация, эффективная масса ионов, альвеновская скорость, в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров по данным магнитных измерений в диапазоне частот 0,1–10 Гц.

Предлагается гипотеза о существовании в надионосферной области магнитосферы резонатора для альвеновских волн, нижними торцами которого служат перегибы плотности плазмы на высоте 2000–4000 км в северном и южном полушариях, являющиеся одновременно верхними стенками сопряженных ИАР. Приводятся динамические спектры нового образования, вычисленные частоты которого оказываются близки к наблюдаемым.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 16-05-00056 и 16-05-00631.



## **О связи сейсмичности Земли с параметрами межпланетного магнитного поля**

*О. Д. Зотов, И. П. Лавров*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Работа посвящена исследованию связи сейсмической активности Земли с вариациями межпланетного магнитного поля (ММП). Для анализа использованы данные о секторной структуре ММП в виде полусуточных значений направления ММП по линии Солнце-Земля (так называемая полярность ММП, <http://www.izmiran.ru/stp/polar/SSIMF/?ASCII>, 1958–2015). Данные о землетрясениях брались из мировых каталогов ISC (<http://www.isc.ac.uk>, 1964–2010) и USGS/NEIC (<http://neic.usgs.gov>, 1973–2014). Использовались также региональные каталоги Северной Калифорнии (<http://www.ncedc.org>, 1968–2007) и Греции (<http://www.gein.noa.gr>, 1964–2009).

Из каталога полярности ММП отбирались дни, когда ММП меняет направление на противоположное (будем называть эти дни возмущенными) и дни, когда ММП направления не меняет (невозмущенные дни). Из каталогов землетрясений формировались ряды суточных сумм числа землетрясений. Методика анализа заключалась в сравнении статистики землетрясений в возмущенные и невозмущенные дни.

Для Земли в целом и для рассмотренных сейсмоактивных регионов в отдельности показано, что количество регистрируемых землетрясений в среднем больше в возмущенные дни. В невозмущенные дни количество землетрясений в среднем меньше. Также для мировых каталогов отмечено, что эта закономерность наблюдается как для северного, так и для южного полушария Земли по отдельности.

Дополнительный статистический анализ заключался в сравнении распределений числа землетрясений по магнитуде и распределений суточной активности землетрясений для возмущенных и невозмущенных дней соответственно.

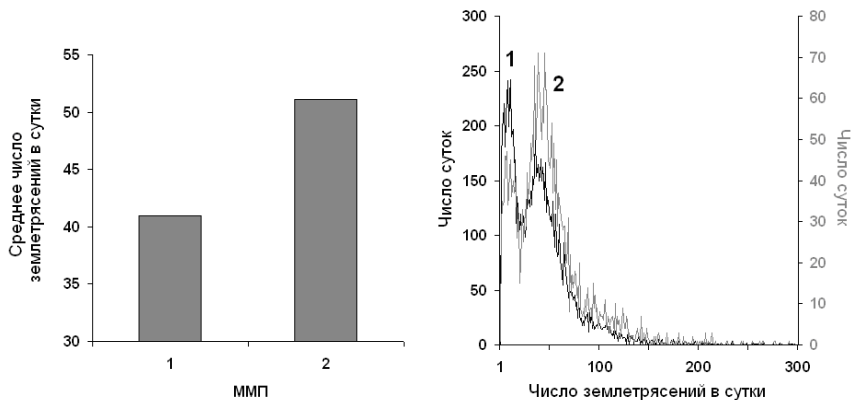
Для примера на рис. 1 и рис. 2 показаны результаты, иллюстрирующие влияние ММП на сейсмическую активность по данным о землетрясениях в Северной Калифорнии. В анализ вошли все землетрясения из каталога без какой-либо селекции по магнитуде.

Наклон черной прямой на рис. 2 справа свидетельствует о том, что формы распределений, представленные на рис. 2 слева, неидентичны.

Результаты, аналогичные представленным на рис. 1 и рис. 2, получены при анализе всех упомянутых выше каталогов землетрясений.

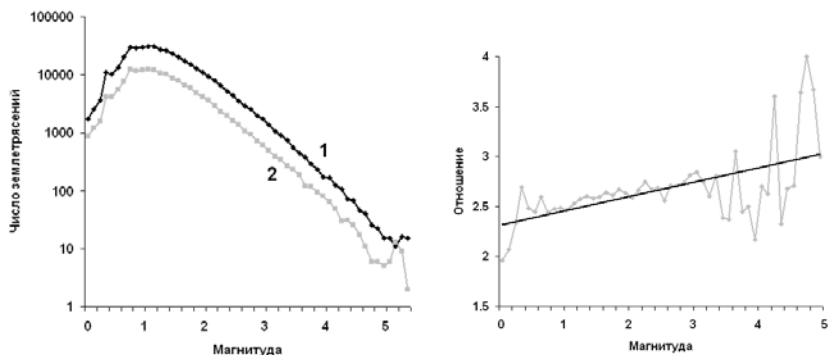
Обнаружен эффект влияния полярности ММП на региональную и мировую сейсмическую активность.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ 16-05-00056 и 15-05-00491.



**Рис. 1.** Слева — среднее число землетрясений в сутки в зависимости от невозмущенного (1) и возмущенного (2) состояния ММП. Справа — распределение числа суток по количеству землетрясений в сутки для невозмущенных (1) и возмущенных (2) суток.

Эти распределения различны на уровне значимости  $p < 0,001$  (непараметрический критерий Колмогорова-Смирнова).



**Рис. 2.** Слева — распределение землетрясений по магнитуде для невозмущенных (кривая 1) и возмущенных (кривая 2) дней; справа — отношение кривой 1 к кривой 2 (серая кривая) и линейная аппроксимация отношения (черная прямая линия).

## **Низкочастотные электромагнитные волны в магнитосфере Земли**

*Б. И. Клайн*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Кратко рассмотрено современное состояние проблемы исследования среднеширотных и высокоширотных геомагнитных пульсаций. Представлены различные аспекты этой тематики. Дано описание последних исследований в этом направлении, ведущихся в ГО «Борок» ИФЗ РАН. Обсуждаются некоторые вопросы взаимодействия в системе магнитосфера – атмосфера – литосфера.

## Влияние ориентации межпланетного магнитного поля на возбуждение среднеширотных изолированных всплесков пульсаций $Pi2$

*Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Известно, что иррегулярные геомагнитные пульсации  $Pi2$  с периодами  $\sim 40\text{--}150$  сек могут наблюдаться в виде изолированного всплеска, а также в виде последовательности волновых пакетов (серий всплесков) в широком диапазоне широт и долгот [1–2]. Ранее нами исследованы межпланетные условия, на фоне которых происходит возбуждение среднеширотных серий всплесков пульсаций  $Pi2$ , наблюдаемых во время развития суббурь и в их отсутствие в ночном секторе аврорального овала [3]. Данная работа посвящена исследованию влияния ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) на возбуждение изолированных всплесков геомагнитных пульсаций  $Pi2$ , регистрируемых на ночной стороне Земли. Для исследования использованы данные регистрации магнитного поля среднеширотной обсерватории «Борок» ИФЗ РАН (исправленные геомагнитные координаты  $\Phi = 53,6^\circ$ ;  $\Lambda = 114,4^\circ$ ) (данные архива ГО «Борок») и одноминутные данные параметров плазмы солнечного ветра и ММП из базы данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) с 1993 по 1998 годы.

Анализировались две группы изолированных всплесков  $Pi2$ : суббуревые  $Pi2$ , наблюдаемые в фазу развития суббурь (323 случая) и несуббуревые  $Pi2$ , появляющиеся в отсутствие суббурь на ночной стороне (296 случаев). В качестве характеристики ориентации ММП мы рассматривали угол  $\theta_{xB} = \arccos(B_x/B)$  (угол между вектором ММП  $B$  и его радиальным направлением). Методом наложения эпох была проанализирована ориентация вектора ММП за 2 часа до и 2 часа после начала возбуждения изолированных всплесков  $Pi2$ . За реперную точку принимался момент начала изолированных всплесков  $Pi2$ . Обнаружено, что за 1,5–2 часа до момента наблюдения суббуревых и несуббуревых всплесков  $Pi2$  направление вектора поля  $B$  радиально. Возбуждение изолированных всплесков  $Pi2$  начинается тогда, когда угол  $\theta_{xB} \rightarrow 90^\circ$ , т. е. при направлении вектора ММП, перпендикулярном линии Солнце – Земля.

Кроме того, методом наложения эпох было проанализировано поведение углов, характеризующих ориентацию вектора  $B$  в плоскости эклиптики и в плоскости ей перпендикулярной на более коротком временном интервале (за 40 минут до и 40 минут после их начала). Характеристиками ориентации ММП в плоскости эклиптики и плоскости, ей перпендикулярной, служили углы  $\varphi = \arctg(B_y/B_x)$  ( $\varphi$  — угол между  $B_x$ -компонентой и проекцией вектора  $B$  на плоскость эклиптики) и  $\xi = \arctg(B_y/B_z)$  ( $\xi$  — угол между вер-

тикальной компонентой ММП и проекцией вектора ММП на плоскость  $YZ$ ). Показано, что динамика углов  $\varphi$  и  $\xi$  вблизи реперной точки противофазна для суббуревых и несуббуревых всплесков  $Pi2$ . Примерно за 15 минут до репера наблюдается поворот вектора ММП в плоскости эклиптики и в плоскости, ей перпендикулярной как в случае наблюдения суббуревых, так и несуббуревых всплесков  $Pi2$ . Всплески  $Pi2$ , возбуждаемые во время суббури и в их отсутствие, наблюдаются на фоне положительных и отрицательных значений угла  $\varphi$ , соответственно. Также возбуждение всплесков двух групп происходит при разных знаках угла  $\xi$ : суббуревых всплесков  $Pi2$  при  $\xi < 0$ , а несуббуревых  $Pi2$  при  $\xi > 0$ .

Предполагается, что направление вектора ММП, перпендикулярное линии Солнце – Земля, является определяющим фактором для интенсификации волновых процессов в хвосте магнитосферы, а своеобразным триггером изолированных всплесков  $Pi2$  двух групп является переориентация вектора ММП в плоскости эклиптики и плоскости, ей перпендикулярной  $\sim$  за 15 мин до их начала.

Сравнение межпланетных условий наблюдения изолированных суббуревых и несуббуревых всплесков  $Pi2$ , проанализированных нами, с условиями наблюдения ВВФ (Bursty Bulk Flows) в хвосте магнитосферы, исследованными в работе [4], показало, что они во многом совпадают. Это позволяет в качестве наиболее вероятного источника изолированных всплесков  $Pi2$  рассматривать пульсирующие потоки плазмы — ВВФ [4] в плазменном слое хвоста магнитосферы. Учитывая тот факт, что альвеновская скорость в области возникновения ВВФ составляет  $\sim 200$  км/с [5], средняя скорость солнечного ветра во время наблюдения всплесков  $Pi2$  равна  $\sim 400$  км/с и изменения в ориентации вектора ММП возникают  $\sim$  за 15 мин до наблюдения  $Pi2$  на Земле, получаем, что генерация изолированных всплесков  $Pi2$ , скорее всего, происходит в хвосте магнитосферы на расстоянии  $\sim 10\text{--}15 Re$ .

### Литература

1. *Троицкая В. А.* Устойчивые колебания и колебания типа цугов в Арктике и Антарктике // Короткопериодические колебания электромагнитного поля Земли. М.: Наука, 1961. С. 41–61.
2. *Saito T.* Geomagnetic pulsations // Space Sci. Rev. 1969. V. 10. P. 319–412.
3. *Куражковская Н. А., Клайн Б. И.* Некоторые особенности характеристик среднеширотных суббуревых и несуббуревых геомагнитных пульсаций  $Pi2$  и условий их возбуждения // Геомагнетизм и аэронаомия. 2014. Т. 54. № 1. С. 43–54.
4. *Zhang L. Q., Baumjohann W., Wang C., Dai L., Tang B. B.* Bursty bulk flows at different magnetospheric activity levels: Dependence on IMF conditions // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. P. 8773–8789.
5. *Xing X., Wang C.-P., Liang J., Lyons L. R.* Plasma sheet  $Pi2$  pulsations associated with bursty bulk flows // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. P. 8692–8706.

## Поляризационные характеристики высокоширотных геомагнитных импульсов МІЕs

*Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Внезапные импульсные изменения всех компонент магнитного поля продолжительностью 6–12 минут и амплитудами от 10–20 до нескольких сотен нанотесла идентифицируют как геомагнитные импульсы — МІЕs (Magnetic Impulse Events) [1–3]. МІЕs наблюдаются в дневном секторе высокоширотной магнитосферы при слабой или умеренной геомагнитной активности ( $K_p \sim 1-3$ ) [4]. Статистическому изучению морфологических закономерностей МІЕs посвящена обширная литература, например [1–7]. В настоящей работе исследованы поляризационные характеристики (тип поляризации, эллиптичность  $\epsilon$ , угол наклона главной оси эллипса поляризации  $\tau$ ) геомагнитных импульсов, наблюдаемых на широте дневного полярного каспа.

Для исследования поляризации МІЕs использовались данные наблюдений магнитного поля с минутным разрешением Антарктической обсерватории Мирный (исправленные геомагнитные координаты  $\Phi' = -76,93$ ,  $\Lambda' = 122,92$ ) за период 1989–1991, 1995–2003 гг. из Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике [[http://www.wdcb.ru/stp/data/geo\\_min.val/](http://www.wdcb.ru/stp/data/geo_min.val/)] (Москва) и одноминутные данные параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), полученные с сайта [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>] за эти же интервалы времени.

Обнаружено, что все импульсы обладают эллиптической поляризацией, причем в 43 % случаев они — правополяризованы ( $R$ -тип) и в 57 % случаев — левополяризованы ( $L$ -тип). Правополяризованные МІЕs на земной поверхности лучше выражены в азимутальном направлении, а левополяризованные импульсы в меридиональном направлении. Показано, что от типа поляризации импульсов зависит суточная и сезонная вариация их частоты наблюдения и амплитуды. Характеристики поляризации  $\epsilon$  и  $\tau$  слабо или совсем не зависят от локального времени и сезона. Импульсы  $R$ - и  $L$ -типа преимущественно наблюдаются на фазе спада и подъема солнечной активности, соответственно. Для возбуждения правополяризованных импульсов наиболее благоприятны высокоскоростные потоки солнечного ветра (High-Speed Streams — HSSs), а для левополяризованных импульсов скорее благоприятны выбросы корональных масс (Coronal Mass Ejection — CME). Установлено, что импульсы  $R$ -типа возникают при ориентации вектора ММП, близкой к радиальному направлению на фоне развития умеренных магнитосферных суббурь, а  $L$ -типа при направлении, перпендикулярном линии Солнце – Земля на фоне отсутствия суббурь. Показано, что вблизи момента

начала импульсов обоих типов происходит смена ориентации  $B_z$ -компоненты ММП с северного направления на южное при вполне определенной конфигурации магнитного поля в потоке солнечного ветра в период, предшествующий появлению МIEs. Геомагнитные импульсы обоих типов поляризации обладают свойствами перемежающихся процессов. Поведение поляризационных характеристик импульсов существенно зависит от величины  $B_z$ -компоненты ММП и от величины угла  $\theta_{XB} = \arccos(B_x/B)$ . Предполагается, что в условиях спокойной или умеренно-возмущенной магнитосферы триггером геомагнитных импульсов двух типов является слабые кратковременные вариации южной компоненты ММП, источником которых являются неоднородности солнечного ветра с дугообразной конфигурацией годографов ММП в плоскости эклиптики, которые определяют тип поляризации импульсов. В качестве возможного механизма генерации импульсов  $R$ - и  $L$ -типа можно рассмотреть модель переключающей перемежаемости, ранее предложенной в работах [5–6].

В рамках данной работы мы предприняли попытку выявления сходства и различия закономерностей импульсов  $R$ - и  $L$ -типа, а также поиска факторов, определяющих их тип поляризации на основе статистического анализа. Вопрос об интерпретации некоторых особенностей импульсов  $R$ - и  $L$ -типа и об их конкретном механизме генерации остается во многом открытым.

### Литература

1. Lanzerotti L. J., Konik R. M., Wolfe A., Venkatesan D., MacLennan C. G. Cusp latitude magnetic impulse events. 1. Occurrence statistics // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A8. P. 14,009–14,022.
2. Konik R. M., Lanzerotti L. J., Wolfe A., MacLennan C. G., Venkatesan D. Cusp latitude magnetic impulse events. 2. Interplanetary magnetic field and solar wind conditions // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № A8. P. 14,831–14,853.
3. Kurazhkovskaya N. A., Klain B. I., Dovbnya B. V. Patterns of simultaneous observations of high-latitude magnetic impulses (MIEs) and impulsive bursts in the Pc1-2 band // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2007. V. 69. P. 1680–1689.
4. Moretto, T., Sibeck D.G., Watermann J.F. Occurrence statistics of magnetic impulsive events // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 585–602.
5. Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Зотов О.Д. Некоторые особенности высокоширотных геомагнитных импульсов и возможный механизм их генерации. Геофизические исследования: сб. научн. тр. / Институт физики Земли РАН. М.: ИФЗ РАН. 2005. Вып. 3. С. 63–73.
6. Клайн Б. И., Куражковская Н. А., Зотов О. Д. Исследование амплитудных закономерностей высокоширотных магнитных импульсов. Солнечно - Земная физика: сб. научн. тр. / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние. 2007. Вып. 10. С. 81–88.
7. Куражковская Н. А., Клайн Б. И. Геомагнитные импульсы (MIEs) и импульсы внезапных начал магнитных бурь (SSCs) в высокоширотной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 1. С. 33–45.

## **Магнитосферные процессы и оценка их влияния на формирование факторов космической погоды**

*Похотелов О. А.*

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Разработана нелинейная теория эволюции зеркальной неустойчивости магнитошиа и солнечного ветра, учитывающая как особенности квазилинейного уплощения функции распределения на начальной стадии, так и срыв динамической системы в коллапс с последующей стабилизацией из-за нелинейной вариации ионного ларморовского радиуса. Исследованы отличия в нелинейной эволюции зеркальной неустойчивости и неустойчивости Фрида-Вейбеля. Было показано, что финалом развития зеркальной неустойчивости являются уединенные солитоны или кноидальные волны в форме магнитных ям. В случае же неустойчивости Фрида-Вейбеля происходит образование филаментов — тонких нитевидных структур с толщиной порядка скин-длины. Предсказания теории использовались при анализе данных космического эксперимента CLUSTER, а также данных недавно запущенных спутников THEMIS, обладающими большим разрешением по времени по сравнению с данными CLUSTER. Это преимущество особенно важно при идентификации соответствующих мод, так как типичный временной интервал магнитных ям меньше, чем временное разрешение магнитометра доступное на спутниках CLUSTER. Использование данных THEMIS позволило получить более детальную информацию о характере эволюции нелинейных возмущений в околоземном космическом пространстве.



## **Нелинейная модификация плотности фоновой плазмы под действием пондеромоторной силы, обусловленной пульсациями $Pc1$ на дневной стороне магнитосферы Земли**

*А. К. Некрасов, Ф. З. Фейгин*

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Проведены аналитические и численные исследования нелинейной модификации плотности фоновой плазмы на дневной стороне магнитосферы Земли вследствие действия пондеромоторной силы, индуцированной геомагнитными пульсациями  $Pc1$ . Получено выражение для пондеромоторной силы, отличающееся от предыдущих аналогичных результатов. Рассмотрено действие пондеромоторной, гравитационной и центробежной сил на модификацию магнитосферной плазмы в двухдипольном геомагнитном поле по модели Антоновой и Шабанского. Представлены результаты особенностей поведения пондеромоторной силы в магнитных ямах, образованных под действием давления солнечного ветра.

**Наблюдаемые спектральные резонансные структуры  
в диапазоне Pc1 и собственные частоты  
ионосферного альфвеновского резонатора**

*Ф. З. Фейгин, Ю. Г. Хабазин*

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Представлены результаты сравнения спектральных резонансных структур электромагнитного шума в частотной области 0–5 Гц, с численными моделями ионосферного альфвеновского резонатора, использующими данные радара EISCAT, по наблюдениям на высокоширотной обсерватории Кильписъярви (Abykzylbz) 21 сентября 1998 г.

Показано хорошее совпадение наблюдаемых параметров спектральных резонансных структур и результатов численного моделирования.

## Среднеширотные геомагнитные пульсации Pc1 по результатам наблюдений обсерватории «Борок» в 1998 – 2014 гг.

С. В. Анисимов<sup>1</sup>, Н. М. Шихова<sup>1</sup>, Н. Г. Клейменова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Разработан алгоритм автоматического обнаружения короткопериодных геомагнитных пульсаций Pc1 ( $f = 0,2\text{--}3$  Гц) по результатам непрерывной цифровой регистрации 1998–2014 гг. на среднеширотной обсерватории Борок. Создан цифровой каталог с указанием временных интервалов наличия пульсаций Pc1 и их основных морфологических характеристик. Основываясь на данном каталоге, исследована годовая, сезонная и суточная динамика среднеширотной активности Pc1 пульсаций в 1998–2014 гг.

Показано, что в годовой вариации появлений пульсаций Pc1 имеется максимум в 2005 г., т. е. в конце фазы спада солнечной активности. Обнаружено, что минимум случаев появления Pc1 наблюдается в 2009 г., т. е. не в максимуме, а во время глубокого минимума солнечной активности, что свидетельствует о нетипичных условиях в магнитосфере во время необычно длительного минимума 23-го цикла. В сезонном ходе появления пульсаций Pc1 минимум отмечается летом, когда число случаев появления серий Pc1 пульсаций почти втрое меньше, чем зимой. Кроме того, отмечены небольшие максимумы в равноденствия.

Суточные вариации появления Pc1 в 1998–2014 гг. показывают, что в суточном ходе генерации Pc1 имеется два основных максимума — в утреннее-дополуденное и ночное время с небольшим максимумом в интервале 06–09 MLT. Минимальная Pc1 активность отмечена в послеполуденные часы (15–20 MLT).

Для выяснения связи генерации геомагнитных пульсаций Pc1 с геомагнитной активностью было проанализировано 90 случаев геомагнитных возмущений с  $A_p > 90$  с использованием метода наложенных эпох. Максимум появления Pc1 отмечался на 4-й день после сильных возмущений геомагнитного поля. Анализ данных наблюдений Pc1 в 1998–2014 гг. показал, что в магнитовозмущенный день, как правило, пульсаций Pc1 в обсерватории Борок не наблюдалось.

Анализ распределения длительности серий Pc1 пульсаций показал, что оно подчиняется экспоненциальному закону, т. е. вероятность появления пульсации большой продолжительности обратно пропорциональна продолжительности серии пульсаций: чем больше длительность серии геомагнитных пульсаций Pc1, тем меньше вероятность появления таких серий.



## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

## **Аэроэлектрическое поле средних широт по результатам наблюдений обсерватории «Борок»**

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев,  
А. С. Козьмина, А. А. Прохорчук*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Атмосферное электричество имеет многовековую историю и заслуженно относится к одному из фундаментальных разделов геоэлектродинамики. Электричество нижней атмосферы в значительной мере определяет электрическое сопротивление столба атмосферы и электродинамическую вариабельность глобальной электрической цепи [1].

Представлены результаты натурных наземных аэроэлектрических наблюдений, а также объемной активности радона и концентрации аэрозольных частиц, выполненных на Геофизической обсерватории «Борок» [58°04' N; 43°26' E]. Приведены результаты численного моделирования характерных суточных вариаций основных аэроэлектрических величин, а также интенсивности ионообразования в невозмущенной нижней атмосфере над сушей средних широт. Показано, что конвективный перенос радона приводит к более однородному высотному распределению электрической проводимости и увеличению напряженности поля в приземном слое [2–6].

До высот около 400 м электрическое состояние атмосферы исследовалось с использованием привязного аэростата с автономной аппаратной платформой и наземного информационно-измерительного комплекса среднеширотной геофизической обсерватории «Борок». По результатам измерений высотных профилей напряженности атмосферного электрического поля, полярных электрических проводимостей, спектрального распределения счетной концентрации аэрозольных частиц и объемной активности радона выполнены оценки средних значений измеренных величин, а также вариабельности плотности объемного заряда и атмосферного вертикального тока проводимости. Исследована высотная зависимость электрического потенциала по отношению к поверхности земли и электрического сопротивления столба приземной атмосферы при различной температурной стратификации.

Обсуждаются физические механизмы и модельные оценки изменений вертикальных аэроэлектрических профилей (удельной электрической проводимости, плотности объемного заряда и напряженности электрического поля) в невозмущенной нижней атмосфере средних широт, связанные с эволюцией атмосферного пограничного слоя, изменением скорости эсхалиции и адвекции радона, а также суточной вариацией ионосферного потенциала.

Работа проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-10209).

### Литература

1. *Анисимов С. В., Мареев Е. А.* Геофизические исследования глобальной электрической цепи // *Физика Земли*. 2008. № 10. С. 8–18.
2. *Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M.* Space charge and aeroelectric flows in the exchange layer: an experimental and numerical study // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136, P. 244–254.
3. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // *Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 4. С. 445–454.
4. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В.* Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016, Т. 9, № 4, С. 7–14.
5. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 155–170.
6. *Anisimov S. V. Galichenko S. V., Mareev E. A.* Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res.* 2017. V. 194, P. 119–129.

## **Натурные наблюдения атмосферного электричества: высотные профили и измерения над поверхностью воды**

*К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, А. В. Гурьев*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Исследование механизмов формирования глобальной электрической цепи (ГЭЦ) — актуальная задача современной геофизики [1]. Электрические процессы, происходящие в атмосферном пограничном слое (АПС), обусловлены как действием ГЭЦ, так и динамическими процессами регионального масштаба [2]. Результаты натурных наблюдений электричества АПС с применением современной измерительной аппаратуры позволяют сформировать входные параметры, необходимые для физико-математического моделирования электрического состояния АПС над сушей и водной поверхностью.

Для натурных наблюдений высотных аэроэлектрических профилей АПС разработана, реализована и испытана в полевых условиях аэростатная аппаратная платформа. В качестве подъемного элемента использовался газовый аэродинамический привязной аэростат с рабочим объемом  $75 \text{ м}^3$  и грузоподъемностью 25 кг. Полевые наблюдения атмосферного электричества над поверхностью воды осуществлялись с помощью автономной плавучей платформы. Основу платформы представлял модульный понтон площадью  $4 \text{ м}^2$ . Аппаратный комплект экспериментальных платформ (аэростатной [3] и плавучей) состоял из электростатических флюксометров, датчика полярных удельных электропроводностей воздуха, датчика концентраций аэрозольных частиц, радон-монитора, метеодатчиков, GPS и барометрического альтиметра. Для работы в составе экспериментальных платформ разработаны, реализованы и испытаны электростатические флюксометры вибро-ротационного типа. Так же разработаны и построены миниатюрные и быстрые опытные образцы датчиков полярных удельных электропроводностей воздуха. Питание автономных платформ осуществлялось от батарей аккумуляторов, что требовало от аппаратного обеспечения высокой энергоэффективности. Применение современных технологий и элементной базы позволили разработать и реализовать аппаратное и программное обеспечение опытных образцов эффективных аппаратных платформ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 16-17-10209) и частичной поддержке РФФИ (грант № 15-05-04960).

### **Литература**

1. *Анисимов С. В., Мареев Е. А.* Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли, 2008, № 10, С. 8–18.
2. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана, 2014, Т. 50, № 4. С. 445–454.
3. *Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Гурьев А. В.* Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // Научное приборостроение. 2017, Т. 27, № 1 С. 21–24. ISSN 0868–5886



## **Суточная вариация высотного профиля электрического поля нижней атмосферы: результаты наблюдений и математического моделирования**

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. А. Прохорчук*  
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Одним из первых подтверждений гипотезы Вильсона [1] о существовании планетарной электрической цепи послужили результаты измерений атмосферного электрического поля в течение длительной морской экспедиции, так называемая кривая Карнеги [2], которая обнаружила глобальный характер суточной вариации напряженности электрического поля в невозмущенной чистой атмосфере над океаном, получившей впоследствии название унитарная вариация. Характер суточной вариации атмосферного электрического поля над сушей отличается от унитарной вариации появлением на кривой дополнительного максимума в утренние часы местного времени, связанного с региональными атмосферными факторами [3, 4]. Многолетние измерения электрической проводимости воздуха и напряженности атмосферного электрического поля, нацеленные на изучение их вариабельности, установили наличие суточной периодичности в изменениях проводимости, ее годового хода, а также связи локальных изменений поля с изменениями проводимости [5].

В настоящей работе исследуются причины локальной вариабельности атмосферных электрических величин и оценивается влияние региональных процессов на изменчивость высотных профилей электрической проводимости, плотности объемного заряда и напряженности электрического поля нижней атмосферы в отсутствие возмущений, связанных с грозовой активностью, мезомасштабными конвективными системами и антропогенными воздействиями. Особое внимание уделяется раскрытию механизмов, ответственных за отличие суточной вариации атмосферного электрического поля, регистрируемого на континентальных станциях, от кривой Карнеги. В частности, исследуются причины эффекта восхода солнца и появления дополнительного максимума в напряженности приземного электрического поля. Для численных экспериментов используется развитая в работах [6–8] электродинамическая модель, с помощью которой исследуется эволюция высотных профилей электрической проводимости и напряженности атмосферного электрического поля. Результаты моделирования сопоставляются с результатами натурных наблюдений, выполненных на среднеширотной геофизической обсерватории «Борок», а также с результатами ранее проведенных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-10209).

### Литература

1. *Wilson C. T. R.* Investigations on lightning discharges and the electric field of thunder-storms // *Phil. Trans. A.* 1920. V. 221. P. 73–115.
2. *Harrison R. G.* The Carnegie Curve // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34(2). P. 209–232.
3. *Anisimov S. V.* Global electric circuit and lower atmospheric electricity (key point) // *Proc. 12th Conf. ICAE*, 9 – 13 June 2003, Versailles, France. P. 693–696.
4. *Yaniv R., Yair Y., Price C., Mkrtchyan H., Lynn B., Reymers A.* Ground-based measurements of the vertical E-field in mountainous regions and the “Austausch” effect // *Atmos. Res.* 2017. V. 189. P. 127–133.
5. *Israelsson S., Tammet H.* Variation of fair-weather atmospheric electricity at Marsta Observatory, Sweden, 1993–1998 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. V. 63. P. 1693–1703.
6. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // *Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50, № 4. С. 445–454.
7. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли.* 2017. № 1. С. 155–170.
8. *Anisimov S. V. Galichenko S. V., Mareev E. A.* Electrodynamical properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res.* 2017. V. 194, P. 119–129.

## Влияние переноса атмосферного радона на поток радона с земной поверхности

Э. М. Дмитриев

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Радон-222 — благородный радиоактивный газ с временем жизни  $\tau \approx 5,5$  суток, продукт распада радия-226. Выделяясь из минералов и подземных вод в поровое пространство горных пород и почвы, он далее переносится к земной поверхности благодаря диффузии и адвекции и выделяется в атмосферу. При моделировании процессов переноса радона в атмосфере величина плотности потока радона (ППР) с поверхности земли предполагается заданной [1–2]. При этом поток радона с поверхности земли определяется не только содержанием в породе радия-226, но и условиями переноса радона в грунте, в свою очередь зависящими от состояния атмосферы [3–4].

Для оценки воздействия на стационарный поток радона с поверхности земли его турбулентного переноса в атмосферном пограничном слое (АПС) были проведены численные расчеты по модели, описывающей транспорт радона в грунте и атмосфере на основе уравнений переноса с учетом турбулентной диффузии в атмосфере [5]. Полученные модельные высотные профили ОА радона соответствуют наблюдаемым в природе и рассчитанным по более сложным моделям [2]. Результаты численных расчетов показывают, что поправка, вносимая учетом турбулентного переноса радона в АПС, ведет к изменению стационарной ППР менее чем на 1 %, что не превышает погрешности измерений.

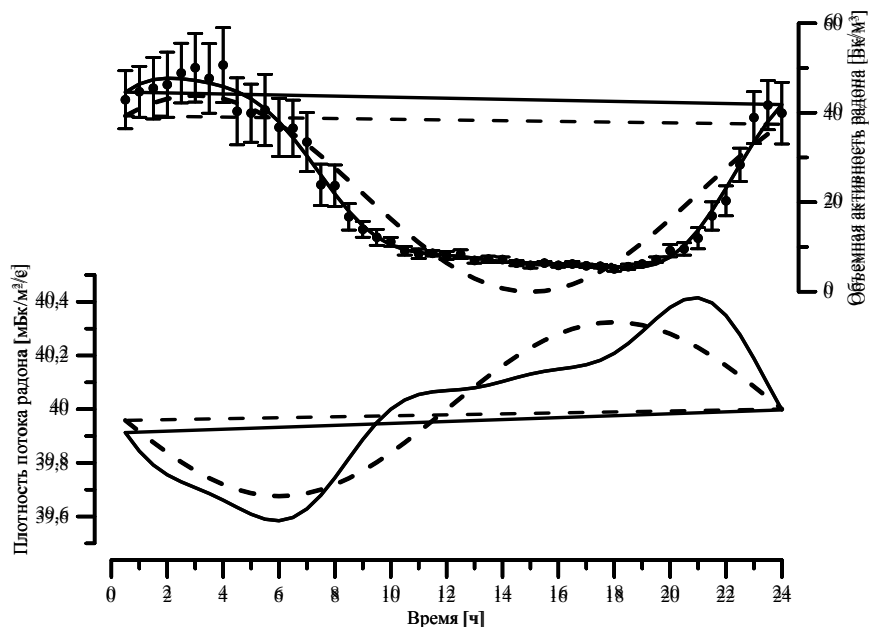
Рассматривая обусловленные изменениями состояния АПС периодические вариации ОА радона на земной поверхности вида

$$A_G(t) = \Delta A \cos(2\pi t/T), \quad (1)$$

где  $\Delta A$  — амплитуда изменения ОА радона на поверхности земли, а  $T$  — его период, из решения задачи транспорта радона в грунте при выполнении граничного условия (1) для ППР на поверхности земли имеем оценку

$$j_G = j_0 + \Delta j_G \cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{8}\right)\right), \quad j_0 = \sqrt{\frac{K_G}{\tau}}(A_\infty - A_0), \quad \Delta j_G = \Delta A \sqrt{2\pi \frac{K_G}{T}}, \quad (2)$$

где  $j_0$  — стационарная ППР,  $\Delta j_G$  — амплитуда ППР,  $K_G$  — коэффициент диффузии радона в почве,  $A_\infty$  — поровая активность радона, находящегося в радиоактивном равновесии с  $\text{Ra}^{226}$ . Расчеты вариаций ППР согласно (2) для типичного суточного хода ОА радона на поверхности земли (рис. 1) также демонстрируют отклонение ППР с земной поверхности от стационарной ППР не превышающее 1 %. Т. о., в расчётах нестационарных распределений радона в АПС можно считать ППР с поверхности земли заданной.



**Рис. 1.** Вверху: характерный суточный ход ОА радона по данным наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН летом 2014 г. [2] и его аппроксимации гармоникой с периодом 24ч (---) и суммой гармоник с периодами 24ч, 12ч, 8ч и 6ч (—). Внизу: соответствующие этим аппроксимациям вариации ППР на земной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 16-17-10209) и РФФИ (грант № 15-05-04960).

### Литература

1. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В. Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2016, Т. 9, № 4. С. 1–9.
2. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 1–16.
3. Яковлева В. С. Моделирование влияния состояния атмосферы и литосферы на динамику плотности потока радона и торона с поверхности земли // *Известия ТПУ*. 2010. Т. 317. № 2. С. 162–166.
4. Perrier F., Girault F. Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 195. P. 945–971.
5. Дмитриев Э. М. Влияние переноса радона в нижней атмосфере на его поток с земной поверхности // *Мат-лы 3-й Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь»*, Борок 25 – 29 сентября 2017. ГО «Борок» ИФЗ РАН, Ярославль. 2017. С. 18–19.

## **ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ**

## **К оценке влияния процессов однофазного окисления и последующего распада природных титаномагнетитов на результаты определения палеонапряженности методом Телье**

*С. К. Грибов*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

С целью оценки влияния процессов термохимического намагничивания изверженных пород на их палеомагнитную информативность выполнено лабораторное моделирование и изучение закономерностей образования химической остаточной намагниченности (CRM) при окислении на воздухе природных псевдооднородных титаномагнетитов (ТМ) базальтовых лав о-ва Сан Томе (Гвинейский залив) в течение 200-часовых изотермических выдержек исходных образцов в интервале температур 250–530°C в магнитном поле порядка земного. Дополнительно на дубликатах отожженных образцов были созданы «чистые» парциальные термоостаточные намагниченности (pTRM), а также комбинации CRM + pTRM. Параллельно проведено комплексное детальное исследование минералогических и магнитных характеристик исходной ТМ фракции, а также прослежено за их изменениями на разных временных этапах изотермических выдержек дублей исходных образцов. Показана прямая корреляция величины намагниченности насыщения продуктов магнитоминералогического преобразования ТМ с интенсивностью CRM.

На образцах с лабораторно-индуцированными остаточными намагниченностями выполнены эксперименты по моделированию методики Телье (в модификации Коэ) определения палеонапряженности. Оценка величины магнитного поля, действовавшего при образовании в лаборатории pTRM, методом Телье-Коэ показала расхождение расчетного и истинного значения не более 17%. Определение данным методом напряженности поля образования CRM-компонент приводит к занижению его значения от 29 до 55% в ходе однофазного окисления ТМ фракции и от 45 до 30% по мере развития процесса окислительного распада катион-дефицитных ТМ. При этом установлено, что по графическим построениям Араи-Нагата процедуры Телье CRM не различается от термоостаточной намагниченности того же материала. С точки зрения палеомагнитной практики это означает, что изверженные породы, содержащие однофазно окисленные титаномагнетиты, могут быть источником существенной ошибки в определении палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье, когда естественная химическая остаточная намагниченность не была распознана как таковая, а ошибочно принята за термоостаточную в экспериментах Телье.

## Циклические изменения палеонапряженности

*А. Ю. Куражковский, Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Поведение характеристик древнего геомагнитного поля (палеонапряженности и частоты геомагнитных инверсий) связано с динамикой конвекционных процессов в жидком ядре Земли. В связи с этим предполагается, что изучение древнего геомагнитного поля может оказаться ключевым элементом в исследовании эволюционных изменений процессов в земном ядре и их связи с процессами на земной поверхности. Кроме того, известны попытки использования палеомагнитных данных для обоснования гипотез изменений объема Земли в течение геологической истории. Обычно заключения о существовании связи между геомагнитными и геологическими процессами делается при обнаружении подобия в их динамике.

В настоящее время достаточно надежно установлено, что в фанерозое поведению характеристик геомагнитного поля (как и многим другим геологическим процессами, например, рифтинг – складчатость, трансгрессии – регрессии) свойственна цикличность с характерными временами порядка 200 млн. лет (циклы Бертрана). В ходе подобных циклов изменения палеонапряженности и частоты инверсий связаны между собой обратной зависимостью [1]. Таким образом, на основе данных об изменениях частоты инверсий можно составить предварительное представление о поведении напряженности геомагнитного поля. В то же время большая длительность этих циклов (соизмеримая с продолжительностью галактического года и цикличностью в системе Земля – Луна – Солнце) позволяет предположить, что подобные изменения геомагнитного поля и геологических процессов могут быть связаны не только с состоянием жидкого ядра Земли, но и с влиянием внешних — космогенных факторов.

Делать заключения о связи изменений геомагнитного поля с процессами в литосфере, которые происходят с малыми характерными временами (порядка первых миллионов лет), достаточно сложно. На таких временных интервалах поведение палеонапряженности и частоты геомагнитных инверсий может существенно различаться. Достаточно отметить, что в меловом суперхроне инверсии геомагнитного поля отсутствовали, но изменения палеонапряженности происходили. Можно предположить, что процессы, вызывающие вариации палеонапряженности и геомагнитные инверсии, различаются. Так, величина напряженности геомагнитного поля явно зависит от энергетики процессов в ядре Земли. Связь режима геомагнитных инверсий с энергией процессов в ядре не столь очевидна. В связи с этим, по нашему мнению, ключевая роль при исследовании динамики процессов в жидком ядре Земли должна принадлежать данным о поведении палеонапряженности.

Ранее нами получены подробные данные палеонапряженности по осадочным породам средней юры – палеогена [2]. На основе этих данных в настоящей работе впервые исследованы основные особенности изменений палеонапряженности на продолжительном (130 млн. лет) интервале геологического времени. Показано, что средние значения палеонапряженности и амплитуды ее вариаций возростали от средней юры до границы мел – палеоген (мезозой – кайнозой). Затем в течение палеогена происходило уменьшение амплитуд вариаций палеонапряженности. Кроме того, обнаружены циклические изменения в поведении напряженности геомагнитного поля с характерными временами около 6 млн. лет. Амплитуда вариаций палеонапряженности в этих циклах изменялась от 20–40 мкТл до 100–200 мкТл. Сопоставление данных палеонапряженности с данными об изменении уровня мирового океана показало, что в поведении этих процессов присутствуют одинаковые цикличности. В цикле длительностью более 100 млн. лет отмечается явное подобие между изменениями палеонапряженности и уровнем мирового океана. Характерные времена коротких циклов изменений палеонапряженности и трансгрессий – регрессий (Т–Р циклов) совпадают и составляют около 6 млн. лет. Погрешности датировок пока не позволяют сделать уверенный вывод о фазовом соответствии этих геомагнитных и Т–Р циклов. Совпадение Т–Р циклов с циклами изменений палеонапряженности является свидетельством существования единого механизма, влияющего на процессы в ядре и литосфере. Такой механизм связи изменений геомагнитного поля с Т–Р циклами ранее предлагался в рамках гипотезы пульсаций объема Земли [3].

### Литература

1. Куражковский А. Ю., Куражковская Н. А., Клайн Б. И., Брагин В. Ю. Геомагнитное поле в геологическом прошлом (за последние 400 млн. лет) // Геология и Геофизика. 2010. Т. 51. № 4. С. 486–495.
2. Куражковский А. Ю., Куражковская Н. А., Клайн Б. И. Стохастическое поведение геомагнитного поля в средней юре – палеогене // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 2. С. 235–246.
3. Милановский Е. Е. О корреляции фаз учащения инверсий геомагнитного поля, понижений уровня мирового океана и фаз усиления деформаций сжатия земной коры в мезозое и кайнозое // Геотектоника. 1996. № 1. С. 3–11.



## **Вариации поступления космической пыли на земную поверхность, записанные в торфяных отложениях**

*В. А. Цельмович<sup>1</sup>, А. Ю. Куражковский<sup>1</sup>, А. Ю. Казанский<sup>2</sup>, А. А. Щетников<sup>3</sup>,  
Т. А. Бляхарчук<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск

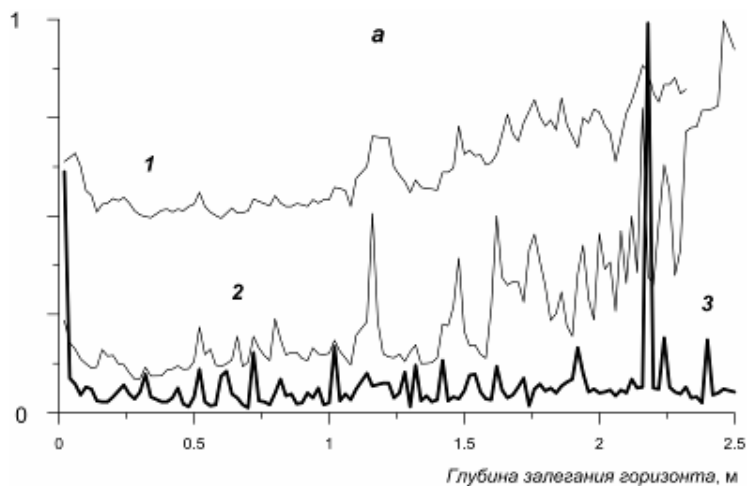
<sup>4</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Космическая пыль (КП) непрерывно поступает на земную поверхность. Об этом свидетельствует обнаружение частиц КП в современных и древних осадочных породах. Высокие концентрации КП в древних отложениях связывают с катастрофическими импактными событиями. Существует непрерывное (фоновое) поступление КП, которое не связано с катастрофами. Динамика поступления такого вещества на земную поверхность не исследована. Нами предпринята попытка обнаружения цикличностей в поступлении КП на Землю. Мы исследовали частицы, размер которых составляет от долей мкм до сотен мкм. Перспективным объектом для изучения изменений поступления КП на земную поверхность в голоцене являются торфяные отложения из верховых болот (разрезы Горка, Тундра, Селенга, Дулиха). В верховых торфяных болотах практически отсутствует горизонтальный перенос частиц минерального вещества — частицы, попавшие на поверхность торфа, фиксируются в месте падения. Это позволяет обнаруживать изменения количества минеральных частиц, поступающих на единицу площади земной поверхности в данном регионе. При отборе образцов через 1–2 см можно изучать вариации поступления КП с временами 10–100 лет.

Для исследования мы использовали керны торфяных отложений, отобранных на территории России, в верховых болотах из различных климатических зон. Образцы торфа помещались в кубические пластиковые контейнеры с ребром 2 см. после чего определялась плотность, зольность и среднее значение величины остаточной намагниченности насыщения (SIRM). Проводилась магнитная сепарация частиц, обладающих остаточной намагниченностью. С помощью СЭМ «Тескан Вега 2» определялся размер, состав и предположительный генезис минеральных частиц, полученных в результате магнитной сепарации. Показано, что высокая намагниченность нижних и верхних горизонтов исследуемых отложений обычно не связана с поступлением КП на Землю.

Установлено, что намагниченность отложений убывает по мере удаления осадочных толщ от областей с засушливым климатом, в которых оловый перенос терригенных минеральных частиц значимо влияет на поведение SIRM. Результаты микронзондовых исследований показали, что поведение SIRM образцов торфа из болот гумидной зоны определяются в основном наличием КП. Таким образом, изменения SIRM по мощности торфяных толщ, образовавшихся-

ся в зонах с высоким увлажнением, могут характеризовать вариации поступления КП на Землю. В поведении SIRM в керне отложений болота Тундра обнаруживается цикличность. Судя по результатам радиоуглеродных датировок характерные времена между возрастаниями SIRM составляли около 100 лет. Наиболее явно эти вариации SIRM видны в интервале 1200–200 лет тому назад. Всплеск SIRM в горизонтах торфа с возрастом около 5000 лет связан с повышенным количеством КП. Намагниченность этой толщи отражает динамику поступления КП на Землю. Изменения величины SIRM могут служить количественной характеристикой КП. Предположение о глобальном характере обнаруженных вариаций поступления КП должно быть проверено на основе изучения других толщ, образовавшихся в условиях гумидного климата.



**Рис. 1.** Изменения плотности (1), зольности (2) и SIRM (3) по глубине торфяной толщи.

Нами отмечено, что наиболее значимо присутствие КП влияет на поведение SIRM. Поведение остаточной намагниченности насыщения отложений верховых торфяных болот из зон, в которых эоловый перенос терригенных частиц пренебрежимо мал, можно использовать для исследования динамики поступления космогенного пылевого вещества на земную поверхность. По отложениям болота Тундра обнаружена цикличность в поступлении космической пыли земную поверхность. Характерные времена этой цикличности около 100 лет. Наиболее явно цикличность в количестве поступления пылевого космогенного материала проявляется в интервале 1200–500 лет тому назад. Большой всплеск поступления КП произошел в районе 5000 лет тому назад.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№16-05-00703а, 15-05-01644, и РНФ № 16-17-10079

## Интенсивность геомагнитного поля в геологическом прошлом: достижения и проблемы

*В. П. Щербаков*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Глобальные физические процессы, которые развиваются внутри Земли, определяют режимы работы геомагнитного динамо и отражаются в поведении различных характеристик геомагнитного поля, важнейшими из которых являются его полярность и напряжённость. Из результатов, полученных по методу Телье-Коз с выполнением процедуры «check-points» на представительных коллекциях образцов различного генезиса и возраста, в ходе выполнения указанной в заголовке темы были сделаны следующие выводы.

1. Средняя интенсивность древнего геомагнитного поля  $H_{др}$  в среднем протерозое была в 2–3 раза меньше его современной величины, что свидетельствует в пользу гипотезы о позднем (не ранее 1 млрд. лет назад) возникновении твёрдого ядра Земли.

2. Получена развёртка поведения  $H_{др}$  по 12 мезозойским лавовым потокам тыванкитской свиты (пермь-триас), при этом вариации  $H_{др}$  от потока к потоку не выходят за пределы ошибок её определения, что может указывать на стационарный характер поведения поля в период формирования разреза. Средние значения виртуального магнитного момента (VDM) по потокам разреза Ергалах и тыванкитской свиты и по образцам дельканской свиты меняются в пределах  $(0.54–3.2) \times 10^{22}$  Ам<sup>2</sup> (с дисперсией  $0.9 \times 10^{22}$  Ам<sup>2</sup>), что заметно ниже среднего VDM ( $8 \times 10^{22}$  Ам<sup>2</sup>) в течение позднего кайнозоя. Эти результаты согласуются с полученными ранее данными для  $H_{др}$  и VDM по разрезам сибирских траппов Норильского и Маймеча-Котуйского регионов и являются доводом в пользу существования эпохи низкого поля на границе пермь–триас на большей части мезозоя.

Низкие и крайне низкие величины  $H_{др}$  (11.2 и 2.7 мкТ) по двум пульсам (5 лавовым потокам) ивакинской свиты разреза Ергалах могут указывать на резкое понижение величины  $H_{др}$  перед инверсией земного поля (или в ее начале), происшедшей на самом раннем этапе формирования норильской туфолоавовой толщи. Можно предположить, что эта группа потоков могла формироваться во время нестационарного состояния геомагнитного поля типа экскурса.

3. Результаты, полученные нами как по палеонаправлениям, так и по палеонапряжённости, подтверждают гипотезу о сложном характере поведения магнитного поля Земли в девоне. Во-первых, здесь имеются многочисленные свидетельства о значимо различающихся палеомагнитных направлениях, существование которых трудно объяснить перемагничиванием или влиянием локальной тектоники. Во-вторых, мы видим низкие и аномально низкие величины палеонапряжённости на большинстве изученных объек-

тов. В совокупности это приводит к мысли о существенной специфике поведения геомагнитного поля в этот период. Можно предположить, что геомагнитное поле в девоне имело слабую дипольную составляющую и вообще в некоторые периоды могло носить мультипольный характер, что могло сопровождаться частыми экскурсами и инверсиями. Если эта гипотеза справедлива, то возникает ряд вопросов об особенностях протекания геофизических процессов в это время. Прежде всего, это вопрос о том, чем же может быть обусловлена смена режима работы геодинамо с генерации сильного преимущественно дипольного поля на слабое, преимущественно мультипольное поле, и как вообще в этом случае осуществляется генерация такого поля. Другой интересной проблемой, возникающей в этой связи, является вопрос о магнитосфере Земли — какой могла быть геометрия магнитосферы, если на протяжении длительного времени магнитное поле Земли было крайне низким по величине, и к тому же преимущественно мультипольным. Очевидно, для ответов на эти вопросы необходимы новые надёжные данные как по направлениям, так и по палеонапряжённости девонского поля.

4. Анализ статистических характеристик функции распределения интенсивности палеополя по данным МБД PINT для эпохи Брюнеса и результатов расчетов по модели БГП для этого же периода показал, что наблюдается заметное расхождение между эмпирическими данными и теоретическими расчётами, а именно: данные по МБД PINT показывают заметное превышение дисперсии и коэффициента асимметрии виртуального осевого магнитного момента (VADM) в сравнении с теоретически предсказанными. Это превышение связано с тем, что в МБД PINT содержится слишком много малых VADM в сравнении с тем, что им предписано по схеме БГП. Поскольку эти же данные согласуются с моделью БГП по палеонаправлениям, такое расхождение нельзя объяснить тем, что малые VADM отвечают экскурсам геомагнитного поля. Предложены два возможных объяснения существования избыточной доли малых VADM: 1) осуществление такого кратковременного режима генерации геомагнитного поля, когда происходит синхронное падение мощности всех компонент его разложения по сферическим гармоникам; 2) занижение палеонапряжённости при работе по методике Телье, что может произойти, если физическая природа естественной остаточной намагниченности (NRM) исследуемой породы является не термостаточной, а химической.

Проведение палеомагнитных исследований невозможно без совершенствования наших знаний в области магнетизма горных пород, который является физической базой палеомагнетизма. Действительно, задачи палеомагнетизма решаются путём расшифровки информации о характеристиках геомагнитного поля, записанной в древних горных породах, что возможно лишь при условии сохранности первичной намагниченности образцов исследуемых горных пород. Для целей определения палеонапряжённости на

вулканических породах, кроме первичности и хорошей сохранности NRM, требуется доказать ещё и её термоостаточную природу (TRM). В то же время известно, что стабильная и значительная по величине остаточная намагниченность (CRM) может быть создана и в результате химических изменений магнитных минералов при повышенных температурах, как в ходе первичного охлаждения породы, так и при её повторных прогревах. Несмотря на большую распространённость такого сценария, он мало исследован как экспериментально, так и теоретически.

Поскольку образование CRM тесно связано с минералогическими и структурными превращениями ферромагнитных зёрен, для понимания механизмов образования этих видов намагниченности нами проведены детальные лабораторные эксперименты по созданию CRM на океанических базальтах, проведён анализ термомагнитных и гистерезисных свойств образцов, несущих этот вид остаточной намагниченности, исследован химический и фазовый состав как исходных, так и термообработанных образцов с помощью комплекса современных магнитных и минералогических методов исследования, выполнены эксперименты Телье на лабораторно созданных CRM.

Показано, что данные по палеонапряженности, полученные по методике Телье на образцах, содержащих CRM в качестве NRM, могут давать существенное занижение величины древнего поля. Исходя из найденных особенностей, рекомендуется направить дальнейшие исследования в области магнетизма горных пород на выявление критериев различия TRM и CRM.

**Магнитное поле в Девоне — дипольное  
или мультипольное? — изучение палеонаправлений  
и палеонапряжённости по девонским вулканическим  
породам Минусинской впадины (Сибирь)  
и Кольского полуострова**

*В. В. Щербакова<sup>1</sup>, Э. Биггин<sup>2</sup>, А. В. Щацилло<sup>3</sup>, Р. В. Веселовский<sup>3,4</sup>,  
В. П. Щербаков<sup>1</sup>, Г. В. Жидков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Ливерпульский университет, Ливерпуль, Великобритания

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Исследования поведения геомагнитного поля на геологических масштабах времени являются крайне важными для понимания процессов, происходящих в ядре Земли, конвекции в мантии и эволюции Земли как планеты. Более того, вопрос, всегда ли структура земного поля была подобна современному полю с доминирующим влиянием аксиального диполя, является фундаментальным для оценки правильности палеогеографических реконструкций и эффективности магнитосферы Земли как щита от солнечной радиации. Выполненные ранее исследования предполагают, что поле в девоне (419–359 Ма) имело сложную конфигурацию. Нами проведено подробное изучение и получены новые надёжные определения палеонапряжённости для горных пород возрастом между 408 и 375 Ма, отобранных в Минусинской впадине (Сибирь) и на Кольском полуострове. Палеонапряжённость  $H_{др}$  определялась тремя разными методами: Телье-Коэ, Вилсона и микроволновым методом, всего было использовано 165 образцов из 25 сайтов. По 6 сайтам Минусинской впадины и 4-м сайтам Кольского полуострова получены надёжные и близкие друг к другу определения  $H_{др}$  ( $< 10$  мкТл), которые почти на порядок ниже средней величины поля в Неогене (50 мкТл). Столь низкие значения величины поля в сочетании со странными положениями виртуальных палеомагнитных полюсов в девоне (полученными и ранее, и в наших исследованиях) дают основание предположить, что геомагнитное поле Земли в этот период могло иметь преимущественно мультипольную геометрию. Как следствие, низкое по величине и мультипольное по геометрии магнитное поле и связанное с этим уменьшение магнитосферы могли увеличить проникновение потока солнечной радиации в магнитосферу, ионосферу и атмосферу Земли и оказать заметное влияние на климат Земли и её биосферу.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

## **Реконструкция напряженно-деформационного состояния сейсмоактивных областей по механизмам очагов землетрясений**

*А. О. Мострюков<sup>1</sup>, В. А. Петров<sup>1</sup>, Р. Н. Петрова<sup>1</sup>, Н. Ю. Васильев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет, Москва

Геодинамика — наука о физической сущности процессов эволюции твердой Земли. Конечная ее цель — на основе известных геолого-геофизических фактов и геодезических данных построить непротиворечивую модель эволюции нашей планеты. Основной задачей геодинамики является объяснение геологических и сейсмических событий с помощью движений и взаимодействий плит и блоков земной коры, обратной задачей — уточнение границ литосферных плит по данным о смещениях земной поверхности. Информация о движениях и напряженно-деформированном состоянии (НДС) земной поверхности и земной коры, обусловленных эндогенными и экзогенными факторами, является важнейшей и для прогноза катастрофических геодинамических процессов (землетрясений, извержений вулканов, оползней, горных ударов и т. п.).

Для изучения НДС сейсмоактивных блоков земной коры основными источниками информации являются геодезические наблюдения за взаимными перемещениями пунктов наблюдений, отражающие смещения земной поверхности, и механизмы очагов землетрясений, показывающие деформации в очагах сейсмических событий. Появление GPS-технологий позволило одновременно получать все три компоненты вектора смещения точек земной поверхности, но стоит отметить, что при выполнении GPS-наблюдений ошибки определения положения пункта по высоте значительно превышают ошибки определения планового положения пункта.

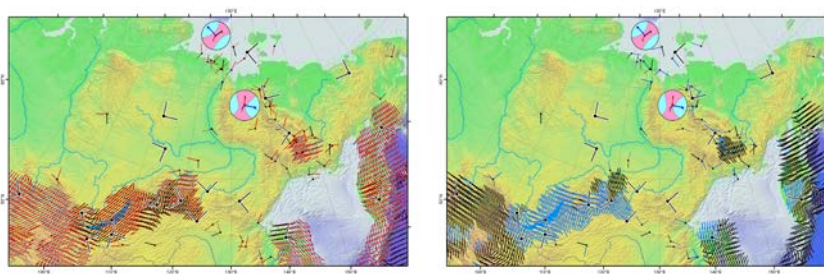
Была проведена обработка бюллетеней региональных и локальных сейсмических сетей и составлены сводные каталоги механизмов очагов землетрясений по данным бюллетеней и опубликованным данным (районы с разной геодинамической обстановкой: Кавказ, Иран, Алтай, Байкал, Камчатка). Все подготовленные каталоги представлены на сайте ИФЗ РАН в открытом доступе ([http://www.ifz.ru/open\\_data/](http://www.ifz.ru/open_data/)). По полученным данным удалось реконструировать поля тектонических напряжений для следующих районов:

- 1). Кавказско-Иранского региона,
- 2). Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ,
- 3). эпицентральной зоны Алтайского землетрясения 2003.09.27,
- 4). района Токтогульского водохранилища Киргизии.



Изучено пространственное распределение среднего тензора напряжений в локальных объемах для различных участков Байкальской рифтовой зоны (радиус выборки  $0,1^\circ$ ) по данным реконструкции главных компонент поля напряжений. На диаграммах заштрихованы области сжатия, при этом форма этих областей отражает величину коэффициента Лодэ-Надаи. Предложена модель механизма нагружения Байкальской рифтовой зоны за последние 140 млн. лет.

Современные поля тектонических напряжений регионального ранга для всей изучаемой территории были определены по каталогам с привлечением данных локальных сейсмических сетей. Проведены реконструкции тектонофизических параметров нагружения и деформации рудовмещающих горных пород и руд пятнадцати месторождений.



**Рис. 1.** Ориентация главных осей сжатия (слева) и растяжения (справа) по совокупностям механизмов очагов землетрясений (густая сетка векторов), осей одиночных механизмов очагов для областей слабой сейсмичности (пары векторов) и осей тензоров напряжений, полученных по геологическим данным для рудных и безрудных объектов.

Каталог землетрясений Токтогульского района был создан на основе работ, выполненных Комплексной сейсмологической экспедицией ИФЗ РАН в период 1957–1991 гг. Работы в этом районе были организованы в связи с проектированием, а затем функционированием каскада гидроэлектростанций. Были проведено районирование территории по виду напряженного состояния, выделены активные разломы, построена карта вертикальных компоненты сейсмодформаций.

Показана возможность реконструкции поля напряжений для разных стадий процесса деформирования земной коры на разных масштабных уровнях и возможность выделения этапов деформирования. Высказана гипотеза о возможном уменьшении главного сжимающего напряжения перед Алтайским землетрясением 2003 года, что могло привести к ослаблению трения в очаговой области.

## Зависимость скоростей распространения упругих волн от напряженного состояния горной породы

*И. О. Баяк<sup>1</sup>, А. В. Патонин<sup>2</sup>, Н. М. Шихова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

На управляемом прессе INOVA в условиях трехосной деформации проведена серия экспериментов на образцах песчаников из нефтенасыщенных горизонтов. Для изучения вариаций напряженного состояния материала, определения его основных механических характеристик и динамики скоростей распространения упругих волн была разработана и отлажена оригинальная методика проведения испытаний. Образец нагружали циклически, при постоянном всестороннем давлении. Предельная нагрузка в циклах постепенно повышалась. В отдельных экспериментах после очередного цикла нагрузка/разгрузка поднималось всестороннее давление. В процессе испытания с помощью системы ультразвукового зондирования проводились измерения скоростей распространения упругих волн по 16 направлениям. При этом 8 направлений были ортогональны оси сжатия образца, а другие 8 направлены под углом  $45^\circ$  к оси сжатия.

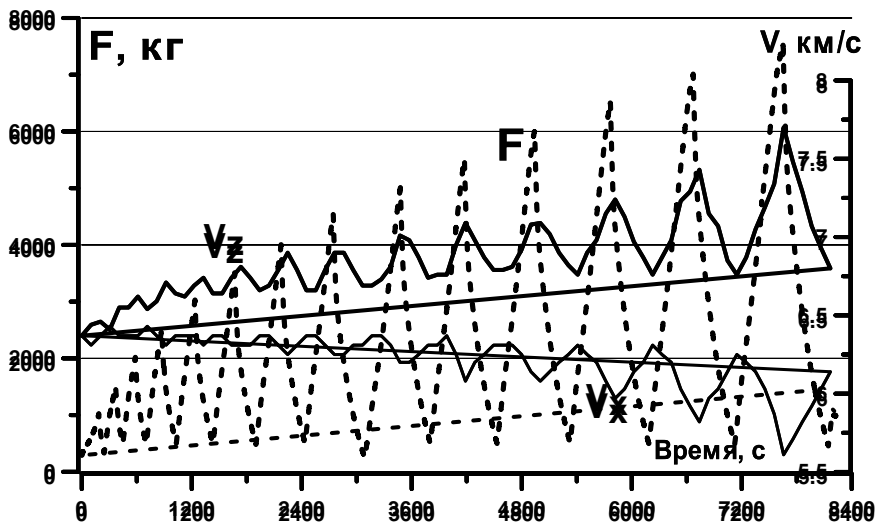


Рис. 1. Осевая нагрузка и скорости распространения упругих волн вдоль ( $V_z$ ) и поперек ( $V_x$ ) оси сжатия.

В процессе постобработки данных рассчитывались и восстанавливались скорости распространения упругих волн вдоль оси сжатия. Методом алгеб-

раической реконструкции восстанавливалось поле скоростей во всем объеме образца. Динамика изменения скоростей распространения упругих волн в направлении вдоль и поперек оси сжатия представлена на рис. 1.

Выполненный анализ показал, что поэтапное повышение предельной нагрузки в каждом из циклов приводило к постепенному разуплотнению материала в результате дилатансии. На восходящей ветви осевой нагрузки скорость упругих волн в осевом направлении росла. Этот рост связан с уплотнением материала под воздействием сжатия. Скорость же волн в направлении, ортогональном оси прикладываемого напряжения, менялась в противофазе. Это вызвано разуплотнением материала и расширением образца в ортогональном оси сжатия направлении. Общий тренд поведения скоростей в двух направлениях также был различен. Так, скорости в осевом направлении в среднем монотонно повышались, в то время как скорости в ортогональном направлении падали. Аналогичная тенденция более ярко проявляется и при испытаниях без всестороннего сжатия.

Полученные результаты важны и используются для геомеханического моделирования при разработке месторождений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 14-17-00658

## Лабораторное моделирование процессов разрушения горных пород

*А. В. Патонин<sup>1</sup>, А. В. Пономарев<sup>2</sup>, В. Б. Смирнов<sup>3</sup>, Н. М. Шихова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

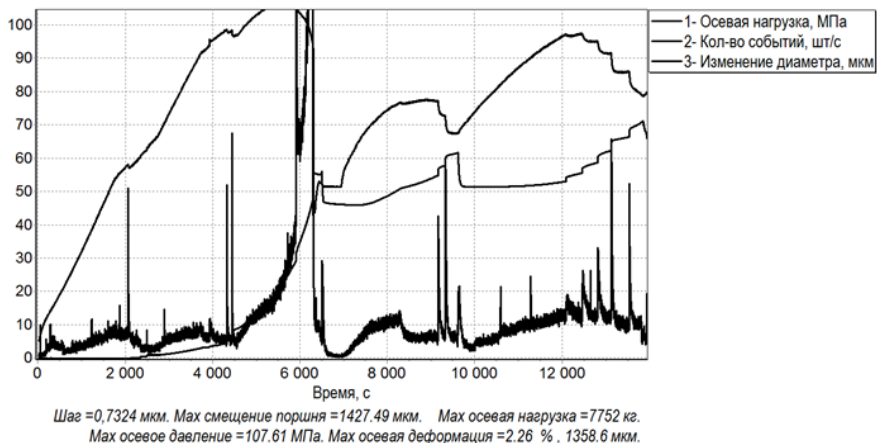
<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Программно-управляемый пресс INOVA ГО Борок в экспериментах с использованием различных горных пород позволяет моделировать зарождение и эволюцию макроразрыва в лабораторном масштабе. В результате многолетней работы по развитию лабораторного испытательного комплекса, созданного на основе программно-управляемого пресса INOVA, совершенствования имеющихся методов и алгоритмов регистрации и обработки данных, добавления новых измерительных систем и модернизации имеющихся, лабораторный геофизический комплекс стал мощным инструментом для исследования процессов, происходящих в образце горной породы под воздействием всестороннего, порового и избыточного осевого давлений [1]. Включение в состав комплекса системы контролируемой подачи порового давления позволила приблизиться к условиям, формируемым в земле на глубинах до нескольких км.

При проведении экспериментов на образцах горных пород нами используется два основных направления моделирования: первое — в условиях одноосной деформации, когда к образцу прикладывается усилие только в осевом направлении. При этом испытанию подвергается как сухой, так и насыщенный образец. Второе направление предполагает испытание в камере всестороннего сжатия. В этом случае к образцу, помещенному в камеру, прикладывается гидростатическое всестороннее давление, которое можно изменять в ходе испытания. Осевое избыточное давление создается прессом по заданному закону. В дополнение к этому, в одно из оснований образца возможна контролируемая подача воды или нефтепродуктов.

Регистрация основных нагрузочных и деформационных характеристик, подаваемых давлений и пролива жидкости, скоростей распространения упругих волн, отдельных волновых форм, непрерывного потока акустической эмиссии производится несколькими системами регистрации. На этапе обработки данные очищаются от шумов и помех, проводится их синхронизация, формируются бюллетени и каталоги акустических событий. Во всем объеме численными методами восстанавливается поле скоростей распространения упругих волн, проводится оценка скейлинговых характеристик афтершоковых последовательностей (b-value, p-value, фрактальной размерности) и вычисляются геомеханические параметры материала на различных этапах эксперимента.

На рис.1 показан пример результатов обработки и представления данных по проведенному эксперименту на образце песчаника.



**Рис. 1.** История нагружения образца песчаника. Вертикальная ось соответствует абсолютным единицам для каждого из представленных параметров.

Данный эксперимент проводился при начальном всестороннем давлении 25 МПа и постоянной скорости деформации. При подходе к пределу прочности (4200 с и 6100 с) было произведено повышение порового давления со ступенями приращения 1, 1, 2,3, 2,3 и 5 МПа. На последней ступени при поровом давлении 11,6 МПа в образце сформировался магистральный разрыв. Затем (6500 с) всестороннее давление было повышено до 38 МПа. После начала «проскальзывания» берегов разлома (9100 с) в зону разлома была подана серия ступеней порового давления с приращениями 0,3, 0,3, 1, 1, 2,3 и 2,3 МПа. Ступени порового давления с приращениями давления 2,3 МПа вызывали быструю подвижку берегов разлома и всплески акустической активности, наблюдаемые на протяжении последующих фаз нагружения.

Все регистрируемые и расчетные параметры проведенных испытаний служат основой формирования единой базы данных, которая в дальнейшем используется при построении различных геофизических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 16-47-02003).

### Литература

1. Патонин А. В., Пономарев А. В., Смирнов В. Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.

## Расчет многодоменных структур методами микромагнетизма

В. П. Щербаков<sup>1, 2, 3</sup>, Н. К. Сычева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Доменная структура (ДС) и её трансформации играют решающую роль в образовании и временной стабильности всех видов остаточной намагниченности горных пород. Строгий подход к расчёту ДС основывается на методах микромагнетизма, но до сих пор он применялся лишь к однодоменным (ОД) и малым псевдооднодоменным (ПОД) зёрнам размера не более 500 нм. В то же время преобладающий объём ферромагнитной фракции в горных породах относится к крупным ПОД и многодоменным (МД) частицам, для которых строгий расчёт ДС микромагнитным методом оказывается слишком трудозатратным. Поэтому для таких зёрен проводились полуколичественные расчёты ДС по модифицированной схеме Амара-Киттеля, предполагающей плоскопараллельные домены равной толщины, разделённые доменной границей (ДГ) с конечной толщиной, с учётом замыкающих доменов [1]. Однако, такие расчёты не позволяют рассчитать остаточный магнитный момент  $M_r$  и учесть влияние более сложных конфигураций типа *vortex*.

В работе предлагается расчёт ДС методами микромагнетизма, со следующими упрощениями: ДС строится из однородно намагниченных кубических блоков произвольного размера и произвольного направления вектора магнитного момента  $\mathbf{M}_s$ , который может изменяться на произвольный угол между соседними блоками. Разворот  $\mathbf{M}_s$  на угол  $\vartheta$  между блоками описывается блоховской границей нулевой толщины. В расчетах учитывалась энергия одноосной анизотропии, обменная энергия ДГ между элементарными кубиками и магнитостатическая энергия. Расчёты проводились для исходных ОД, двухдоменных (2Д), четырехдоменных (4Д) состояний, константа анизотропии  $K > 0$ , лёгкая ось [001] вдоль ребра куба. Мы предположили, что в процессе образования породы магнитные зёрна подвергались сильному стрессу, в следствие чего произошло резкое увеличение их остаточного магнитного момента  $M_{rs}$ . При последующем лабораторном нагреве до умеренных температур происходит снятие этих напряжений, за счёт чего должен произойти резкий спад  $M_{rs}$ . Для моделирования этого явления нами были выполнены расчёты при следующих условиях. Предполагалось, что начальная энергия магнитной анизотропии  $K = 7.1 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>, которая затем постепенно снижалась до  $K = 0.35 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> с интервалом 0.25, при этом равновесное состояние, полученное для предыдущего значения  $K$ , являлось исходным состоянием для значения последующего. Для случая начального

Од состояния поведение относительного суммарного магнитного момента по мере снижения константы анизотропии можно разбить на четыре интервала. При сильной анизотропии до  $K = 4.6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (2 мкм) и до  $K = 2.6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (5 мкм) Од состояние трансформируется в моду «flower» с относительным магнитным моментом  $M_r \approx 0.85$ . Далее до  $K = 2.1 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (2 мкм) и  $K = 1.6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (5 мкм) ПОД мода «flower» переходит в МД структуру с центральной областью намагничивания вдоль оси [001] (5 мкм) или [101] (2 мкм), ближе к граням — области с конфигурацией, близкой к *vortex*, образуются также замыкающие домены,  $M_r \approx 0.53$  (2 мкм) и  $M_r \approx 0.7$  (5 мкм). По мере дальнейшего снижения анизотропии растёт число доменов и уменьшается их размер, образуются области с намагниченностью вдоль оси [111],  $M_r \approx 0.38$  (2 мкм) и  $M_r \approx 0.26$  (5 мкм). Ниже значений  $K = 1.1 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (2 мкм) и  $K = 0.6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> (5 мкм) происходит резкое снижение  $M_r$  до 0.06, наблюдается МД структура с областями намагничивания параллельно-антипараллельно осям [001], [101], [111], а также с конфигурацией *vortex* и замыкающими доменами.

Для исходных 2Д и 4Д состояний для частиц размером 2 мкм со снижением константы анизотропии наблюдается незначительный рост относительного суммарного магнитного момента — до  $M_r \approx 0.006$  и  $M_r \approx 0.015$  соответственно. Полученные в этом случае МД структуры содержат большее, чем изначально, число доменов, в центре частицы — сохраняется исходное 2Д/4Д состояние, также образуются области с конфигурацией *vortex* и замыкающие домены.

По результатам расчетов получено, что при сильной анизотропии идеальные (бездефектные) кубические зёрна магнетита размером несколько микрон остаются в ПОД состоянии. В процессе «нагрева» (который имитируется снижением анизотропии) возникает МД структура с доменами, намагниченными вдоль лёгкой оси намагничивания, замыкающими доменами, модой *vortex*. При дальнейшем снижении анизотропии число доменов растёт, соответственно, снижается их размер.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00259.

### Литература

1. *Shcherbakov V. P., Tarashan S. A., Lamash B. E.* Domain structure of PSD- MD-grains and its temperature dependence // Phys. Earth Planet. Int. 1990. V. 63, P. 21–31.

**УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ**

В. М. Алешков	19	А. К. Некрасов	33
В. В. Алпатов	20	А. В. Патонин	58, 60
С. В. Анисимов	14, 35, 38, 40, 41	А. Ю. Пашинин	19
К. В. Афиногенов	14, 38, 40, 41	В. Г. Петров	16
И. О. Баюк	58	В. А. Петров	56
Э. Биггин	54	Р. Н. Петрова	56
Т. А. Бляхарчук	49	Т. Н. Полюшкина	11
П. А. Будников	20	А. В. Пономарев	60
Н. Ю. Васильев	56	А. С. Потапов	9, 11, 24
Р. В. Веселовский	54	О. А. Похотелов	32
С. В. Галиченко	38, 41	А. А. Прохорчук	38, 41
С. К. Грибов	46	Р. А. Рахматулин	19
А. В. Гульельми	8, 9, 11, 24	В. Ф. Рубан	9
А. В. Гурьев	14, 38, 40	С. Э. Смирнов	17
Э. М. Дмитриев	14, 43	В. Б. Смирнов	60
Б. В. Довбня	9, 24	И. В. Стерликова	9
И. И. Ефишов	20	Н. К. Сычева	62
Г. В. Жидков	54	Н. Ю. Тепеницина	20
А. Н. Зайцев	16	Ф. З. Фейгин	33, 34
О. Д. Зотов	9, 25	М. В. Филатов	20
А. Ю. Казанский	49	Ю. Г. Хабазин	34
Б. И. Клайн	9, 27, 28, 30, 47	В. А. Цельмович	49
Н. Г. Клейменова	6, 7, 35	С. А. Черноус	20
А. С. Козьмина	38	И. И. Шагимурагов	20
Н. А. Куражковская	28, 30, 47	Н. М. Шихова	35, 58, 60
А. Ю. Куражковский	47, 49	А. В. Щацилло	54
И. П. Лавров	9, 25	В. П. Щербаков	51, 54, 62
Ю. В. Липко	19	В. В. Щербакова	54
В. В. Мединский	16	А. А. Щетников	49
А. О. Мострюков	56		



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ</b> _____	3
<b>ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ «БОРОК»:</b> <b>60 ЛЕТ НА РУБЕЖАХ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ</b> _____	4
<b>НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ В. А. ТРОИЦКОЙ</b> _____	5
<i>Н. Г. Клейменова</i> В. А. Троицкая — удивительная и отважная женщина и ученый _____	6
<i>Н. Г. Клейменова</i> В.А. Троицкая и Борок — создатели науки о геомагнитных пульсациях _____	7
<i>А. В. Гульельми</i> В. А. Троицкая и ультранизкочастотные волны _____	8
<i>А. В. Гульельми, Б. В. Довбня, О. Д. Зотов, Б. И. Клайн, А. С. Потапов, В. Ф. Рубан, И. В. Стерликова, И. П. Лавров</i> В. А. Триггеры УНЧ излучений: К столетию В. А. Троицкой _____	9
<i>А. С. Потапов, Т. Н. Полюшкина, А. В. Гульельми</i> Эффект Троицкой-Большаковой: роль альвееновской турбулентности солнечного ветра _____	11
<b>СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ</b> _____	13
<i>С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев, Э. М. Дмитриев</i> Информационно- измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН: состояние и перспективы _____	14
<i>А. Н. Зайцев, В. Г. Петров, В. В. Мединский</i> Система контроля кольцевого тока по данным магнитных обсерваторий России _____	16
<i>С. Э. Смирнов</i> Наблюдения электрического поля на Камчатке 1997–2016 гг. _____	17
<i>Р. А. Рахматуллин, Ю. В. Липко, А. Ю. Пашинин, В. М. Алешков</i> Геофизический комплекс ИСЗФ СО РАН для мониторинга электромагнитных полей в высоких и средних широтах _____	19
<i>С. А. Черноус, И. И. Шагимуратов, М. В. Филатов, П. А. Будников, И. И. Ефшилов, Н. Ю. Тепеницина, В. В. Алпатов</i> Среднеширотные вариации параметров навигационных сигналов в периоды авроральной активности _____	20
<b>МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ</b> _____	23
<i>Б. В. Довбня, А. С. Потапов, А. В. Гульельми</i> Резонансные структуры в магнитосфере Земли _____	24
<i>О. Д. Зотов, И. П. Лавров</i> О связи сейсмичности Земли с параметрами межпланетного магнитного поля _____	25
<i>Б. И. Клайн</i> Низкочастотные электромагнитные волны в магнитосфере Земли _____	27
<i>Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн</i> Влияние ориентации межпланетного магнитного поля на возбуждение среднеширотных изолированных всплесков пульсаций $P_12$ _____	28
<i>Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн</i> Поляризационные характеристики высокоширотных геомагнитных импульсов MIEs _____	30
<i>О. А. Похотелов</i> Магнитосферные процессы и оценка их влияния на формирование факторов космической погоды _____	32
<i>А. К. Некрасов, Ф. З. Фейгин</i> Нелинейная модификация плотности фоновой плазмы под действием пондеромоторной силы, обусловленной пульсациями $P_1$ на дневной стороне магнитосферы Земли _____	33

<i>Ф. З. Фейгин, Ю. Г. Хабазин</i> Наблюдаемые спектральные резонансные структуры в диапазоне Pc1 и собственные частоты ионосферного альфвеновского резонатора _____	34
<i>С. В. Анисимов, Н. М. Шихова, Н. Г. Клейменова</i> Среднеширотные геомагнитные пульсации Pc1 по результатам наблюдений обсерватории «Борок» в 1998–2014 гг. _____	35
<b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ</b> _____	37
<i>С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев, А. С. Козьмина, А. А. Прохорчук</i> Аэроэлектрическое поле средних широт по результатам наблюдений обсерватории «Борок» _____	38
<i>К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, А. В. Гурьев</i> Натурные наблюдения атмосферного электричества: высотные профили и измерения над поверхностью воды _____	40
<i>С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. А. Прохорчук</i> Суточная вариация высотного профиля электрического поля нижней атмосферы: результаты наблюдений и математического моделирования _____	41
<i>Э. М. Дмитриев</i> Влияние переноса атмосферного радона на поток радона с земной поверхности _____	43
<b>ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ</b> _____	45
<i>С. К. Грибов</i> К оценке влияния процессов однофазного окисления и последующего распада природных титаномагнетитов на результаты определения палеонапряженности методом Телье _____	46
<i>А. Ю. Куражковский, Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн</i> Циклические изменения палеонапряженности _____	47
<i>В. А. Цельмович, А. Ю. Куражковский, А. Ю. Казанский, А. А. Щетников, Т. А. Бляхарчук</i> Вариации поступления космической пыли на земную поверхность, записанные в торфяных отложениях _____	49
<i>В. П. Щербаков</i> Интенсивность геомагнитного поля в геологическом прошлом: достижения и проблемы _____	51
<i>В. В. Щербакова, Э. Биггин, А. В. Шаццлло, Р. В. Веселовский, В. П. Щербаков, Г. В. Жидков</i> Магнитное поле в Девоне — дипольное или мультипольное? — изучение палеонаправлений и палеонапряженности по девонским вулканическим породам Минусинской впадины (Сибирь) и Кольского полуострова _____	54
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b> _____	55
<i>А. О. Мострюков, В. А. Петров, Р. Н. Петрова, Н. Ю. Васильев</i> Реконструкция напряженно-деформационного состояния сейсмоактивных областей по механизмам очагов землетрясений _____	56
<i>И. О. Баяк, А. В. Патонин, Н. М. Шихова</i> Зависимость скоростей распространения упругих волн от напряженного состояния горной породы _____	58
<i>А. В. Патонин, А. В. Пономарев, В. Б. Смирнов, Н. М. Шихова</i> Лабораторное моделирование процессов разрушения горных пород _____	60
<i>В. П. Щербаков, Н. К. Сычева</i> Расчет многодоменных структур методами микромагнетизма _____	62
<b>УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ</b> _____	64

Научное издание

**СРЕДНЕШИРОТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ  
ОБСЕРВАТОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

*Материалы*

*Научно-практической конференции,*

посвященной

100-летию со дня рождения Валерии Алексеевны Троицкой  
и 60-летию Геофизической обсерватории «Борок»

Редактор, корректор

Э. М. Дмитриев

Оригинал-макет подготовлен в ГО «Борок» ИФЗ РАН  
152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142.

Подписанов печать 09.10.17. Формат 60x90 1/16.

Усл. печ. л. 4,19. Заказ № 17182. Тираж 80 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ООО «Филигрань».

150049 г. Ярославль, ул. Свободы, д. 91.

pechataet@bk.ru