# Геомагнитные исследования на северо-востоке России

А. В. Моисеев,<sup>1</sup> Г. А. Макаров<sup>1</sup> и Н. И. Неустроев<sup>1</sup>

Получено 20 мая 2011 г.; принято 25 мая 2011 г.; опубликовано 7 июня 2011 г.

Описываются виды наблюдений магнитного поля Земли, проводимых на сети магнитных станций, расположенных на территории Якутии, составляющих экспериментальную базу лаборатории магнитосферно-ионосферных исследований Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера (ИКФИА) СО РАН. Приведено описание системы сбора данных, удаленного доступа к системе сбора данных и современной базы данных наблюдений магнитной обсерватории "Якутск". Приведен ряд научных результатов, полученных за последние годы при исследовании магнитных бурь с внезапным началом.

Ссылка: Моисеев, А. В., Г. А. Макаров и Н. И. Неустроев (2011), Геомагнитные исследования на северо-востоке России, Вестник ОНЗ РАН, 3, NZ5004, doi:10.2205/2011NZ000106.

# Введение

ИКФИА) СО РАН имеет в своем составе магнитную обсерваторию "Якутск". С 2010 г. магнитная обсерватория работает по программе INTERMAGNET. Кроме абсолютных и вариационных измерений проводится регистрация геомагнитных пульсаций в широком диапазоне частот. Институт имеет также стационарные пункты магнитных наблюдений Тикси (с 1957 г.) и Жиганск (с 1977 г.), в которых проводятся вариационные измерения и регистрация геомагнитных пульсаций. В 1990-е годы при сотрудничестве с Нагойским университетом (Япония) на о. Котельный и в пп. Тикси, Чокурдах, Зырянка были установлены цифровые магнитометры и телевизионные камеры для регистрации полярных сияний. Эти станции составляют высокоширотную часть сети магнитометров, работающих в рамках международного проекта MAGnetic Data Acquisition System (MAGDAS).

станции Перечисленные магнитные составляют экспериментальную базу лаборатории магнитосферно-ионосферных исследований. Лаборатория проводит исследования авроральных и субавроральных возмущений, волновой активности, которые являются реакцией на нестационарные условия в солнечном ветре и магнитосферные процессы по данным глобальных геомагнитных наблюдений, оптических и радиофизических измерений на территории Якутии.

# Меридиональная сеть станций на территории Якутии

Институт принимает активное участие в выполнении международного проекта №60 "Передача энергии при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой" совместно с Университетом Кюсю (Япония) [Yumoto et al., 1996]. Участие включает в себя, во-первых, производство непрерывных наблюдений вариаций магнитного поля на шести станциях, оснащенных феррозондовыми цифровыми магнитометрами производства Японии (о. Котельный, Тикси, Чокурдах, Зырянка, Жиганск и Якутск) и регистрацию полярных сияний с помощью телевизионных камер (производства Японии) в Тикси, Жиганске и Якутске; во-вторых, совместный научный анализ данных, полученных в рамках этого проекта, тесные научные контакты и совместные публикации. С 1992 года происходило расширение глобальной сети магнитных станций, вследствие чего Институт участвовал в следующих проектах: 210 MM magnetic station chain (1992–1995 гг.), CPMN (Circum-pan Pacific Magnetometer Network) – 1996–2004 гг., MAGDAS (MAGnetic Data Acquisition System) – с 2005г. Станции Института составляют высокоширотную часть уникальной сети магнитных станций, протяженностью от авроральных широт обоих полушарий до экватора (Рис. 1). С 1992 года накоплен архив цифровых записей вариаций геомагнитного поля и полярных сияний.

### Магнитная обсерватория "Якутск"

В 1932 г. во время 2-го Международного полярного геофизического года в г. Якутске была создана магнит-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

<sup>© 2011</sup> Геофизический центр РАН.

http://onznews.wdcb.ru/doi/2011NZ000106.html



**Рис. 1.** Меридиональная сеть магнитных станций, входящих в международный проект MAGDAS. Квадратами обозначены станции на территории Якутии, окружностями – поля обзора камер полярных сияний.

ная станция. В 1964 г. магнитная обсерватория была перенесена на 10 км южнее Якутска, где и находится в настоящее время (Рис. 2). Имеется архив магнитограмм с 1933 г.

В 2007 г. магнитная обсерватория была оснащена современными магнитометрами в рамках соглашения о международном сотрудничестве между Институтом и Геофизическим центром г. Потсдам (GFZ), Германия. С 2010 г. магнитная обсерватория Якутск является участником программы INTERMAGNET. Цифровая магнитометрическая система обсерватории состоит из деклинометра-инклинометра – THEO 020B, трехкомпонентного феррозондового магнитометра – FGE, и двух оверхаузеровских протонных магнитометров GSM19 и GSM90. Система сбора данных обсерватории основана на регистраторе MAGDALOG, разработанном в GFZ. Для регистрации данных геомагнитных наблюдений используется программное обеспечение (ПО), работающее под операционной системой (ОС) DOS. Классическая схема подключения показана на Рис. За: компьютер А с ОС DOS, на котором установлен регистратор; на этом компьютере настроена сеть с помощью протокола LANMAN/DOSODI.

Файлы данных копируются по сети на компьютер В



**Рис. 2.** Расположение павильонов обсерватории "Якутск": технический павильон (Technical house), павильон абсолютных наблюдений (Absolute house), павильон вариационных наблюдений (Variometer house).

с ОС Linux, на котором установлено ПО для первичной обработки данных; компьютер В подключен к Интернету. Такая схема системы регистрации использовалась в обсерватории в течение 3-х лет. Оказалось, что данную схему можно упростить, совместив эти два компьютера (Рис. 3b), и запустив программу регистрации в среде DOSEMU под Linux. При этом отпадает необходимость настройки сети под DOS, появляется доступ непосредственно к файлам регистратора данных и снижается энергопотребление из-за уменьшения числа ком-



пьютеров. Усовершенствованная таким образом система регистрации работает без сбоев на протяжении уже 5 месяцев.

Регистратор в обсерватории, расположенной в 10 км от Якутска, соединен через радиомост с коммутационным узлом, находящимся в 5 км, который, в свою очередь, соединен по наземной линии sdDSL с оптоволоконной сетью ИКФИА СО РАН, имеющей выход в Интернет (Рис. 4). Данные копируются на компьютер, являющийся веб-сервером, с помощью программы rsync каждые 5 минут. Планировщик задач с той же периодичностью запускает программу, которая загружает новые данные, поступившие с регистратора в базу данных. Эти данные отображаются на веб-сайте ИКФИА СО РАН [http://www.ysn.ru/] с помощью программы, написанной на языке программирования Perl, работающей по технологии FastCGI. Описание программного обеспечения приведено в работе [Турпанов и Стародубцев, 2010]. На данный момент (май 2011 года) общий объем базы составляет 570700 записей.



**Рис. 3.** Регистратор. а) Исходная схема. А – компьютер с ОС DOS, В – компьютер с ОС Linux. b) Новая схема. Компьютер с ОС Linux, на котором запущен DOSEMU.

**Рис. 4.** Топология сети. 1) регистратор, 2) радиомост, 3) коммутационный узел, 4) наземная линия sdDSL, 5) Интернет.



**Рис. 5.** Вариации *H*-компоненты геомагнитного поля, уровня поглощения космического радиошума, ОНЧ-излучения на авроральных и субавроральных широтах в событиях 11.09.2005 г. (а) и 21.01.2005 г. (b). Для события 21.01.2005 г. на верхней панели приведены вариации *B*<sub>z</sub>-компоненты ММП по данным спутника ACE.

### Научные результаты

Ниже кратко приведены некоторые результаты, полученные при исследовании умеренных и сильных магнитных бурь.

#### Магнитные возмущения во время SC

Проведен анализ проявления магнитных возмущений, сопровождающих внезапный импульс (SI), в ОНЧ-излучении и поглощении космического радиошума по наблюдениям на  $L \sim 3-8$ . Рассмотрены квазирегулярные геомагнитные пульсации в диапазоне Рс5 (Рис. 5а) и внезапные авроральные активизации (SA) (Рис. 5b) в дневном и ночном секторах, соответственно. Обнаружено, что геомагнитные пульсации вызывают модуляцию потоков энергичных частиц, что проявляется в генерации ОНЧ-излучения, высыпаниях частиц и в виде бухтообразного возмущения в геомагнитном поле на  $L \sim 3$ . SA в момент SI сопровождается всплеском поглощения на  $L \sim 6 - 8$ . Поглощение на  $L \sim 3$ наблюдается после SI при дальнейшем сжатии магнитосферы, которому предшествовал интервал с отрицательной  $B_z$ -компонентой ММП. Предполагается, что высыпания энергичных частиц в дневном секторе во время SI могут быть обусловлены ускорением частиц электрическим полем волновых возмущений в магнитосфере. В ночном секторе влияние оказывает электрическое поле утро-вечер, проникающее из межпланетной среды в магнитосферу [*Moiseyev et al.*, 2010].

# Геомагнитные и авроральные волновые возмущения во время SC 20 ноября 2003 г.

Исследованы характеристики пульсаций (Psc) с периодом  $T \sim 5-10$  мин, зарегистрированных сразу после

NZ5004



**Рис. 6.** Возбуждение геомагнитных пульсаций Psc в вечернем секторе (a), обусловленных поворотами  $B_z$ -компоненты ММП (b) и пространственной модуляцией яркости аврорального свечения (с и d) после начала SC 20 ноября 2003 г.

начала SC в ~0805 UT 20 ноября 2003 г. Возбуждение Psc в течение ~ 40 мин до ~0840 UT по данным Тикси (Рис. 6а) сопровождалось пространственной модуляцией яркости аврорального свечения с периодами, соответствующими периодам Psc. Модуляция свечения проявлялась в кратковременных повторяющихся бросках сияний к полюсу (Рис. 6с). По данным телевизионных кадров (Рис. 6d) броски сияний к полюсу представляли собой образование новых дуг полярнее предыдущих со скоростью ~ 5 дуг в течение 1,5 мин (Рис. 6d). Возбуждение Psc и модуляция аврорального свечения сопровождались поворотами  $B_z$  ММП от отрицательных значений к положительным и обратно (Рис. 6b).

Предполагается, что источником Psc в этой буре являлась модуляция интенсивности ионосферных токов DP2 в результате вариаций уровня магнитосферной конвекции [*Баишев и др.*, 2004].

### Влияние авроральных электроструй на вариации интенсивности низкоширотных геомагнитных возмущений и *Dst*

Выявлено, что во временных вариациях западной электроструи, а также в вариациях  $\Delta H$  в Чокурдахе (Рис. 7с) присутствуют две компоненты: первая – импульсные вариации тока и  $\Delta H$  с длительностью  $\Delta t \approx 1-2$  часа, регистрирующиеся на всех долготах, но с максимальной интенсивностью в предполуночном–утреннем секторе (обозначены цифрами 1–5). Вторая компонента – регулярная (медленная) вариация с  $\Delta t \approx 10 - 15$  часов (обозначена на Рис. 7b–Рис. 7с сплошной линией). Первая компонента соответствует суббуревым возмущениям, а вторая – конвекционным возмущениям. Показано, что 1-я компонента имеет все признаки экспансивной фазы суббури, вторая



Рис. 7. Вариации Dst и SYM-H индексов (a), интенсивности западной электроструи, проинтегрированной по меридиану цепочек станций Canopus и IMAGE (b), вариации *H*-компоненты поля в Чокурдахе (c) и на низкоширотных станциях Гонолулу (HON) и Енгнинг (YON), расположенных на разных меридианах за период бури 20–21 ноября 2003 г. (d). Светлые и темные кружки – местный полдень и полночь, соответственно. Тонкими извилистыми линиями (b и c) обозначена более плавная компонента тока и  $\Delta H$ .

компонента характеризуется усилением восточной и западной электроструй и их смещением в ходе бури на низкие широты, вплоть до  $\Phi' \approx 50 - 55^{\circ}$ . Суббуревые возмущения (1-я компонента) приводят к импульсным кратковременным усилениям  $\Delta H$  на низких широтах (Рис. 7d, бордовый цвет), что может проявиться в SYM-H и *Dst*. Конвекционная компонента, наоборот, ведет к усилению отрицательных значений  $\Delta H$ , т.е. к усилению Dst и кольцевого тока. Аналогичная реакция низкоширотных возмущений на две компоненты возмущений авроральных электроструй наблюдалась в бурях 7–8 ноября 2004 г. и 9–10 ноября 2004 г. [Соловьев и др., 2008].



**Рис. 8.** Пространственно-временная динамика восточной (JE – красный цвет) и западной (JW – синий цвет) электроструй в 1000–2000 MLT по данным меридиана IMAGE (a), кеограмма аврорального свечения ст. Жиганск ( $\Phi' \approx 61^{\circ}$ ) и *Н*-компонента поля на ст. YON ( $\Phi' \approx 12^{\circ}$ ) в секторе 1800–2400 MLT (b) и вариации  $B_z$  MMП и Pd в периоды магнитной бури 20.11.2003 г. (с).

### Динамика положения области аврорального свечения по меридиану и ее связь с вариациями положения электроструи, $B_z$ ММП и *H*-компоненты на низких широтах

Установлено, что максимальные отрицательные значения  $\Delta H$ -компоненты поля на низких широтах в секторе

1800–2400 MLT, показанные на кеограмме аврорального свечения (Рис. 8b), наблюдаются в периоды наиболее южного положения экваториальной границы аврорального свечения (ЭГАС) при росте отрицательных значений  $B_z$ -компоненты ММП ( $B_z < 0$ , Рис. 8c). Экваториальное смещение ЭГАС происходит синхронно с движением центра восточной электроструи к югу со скоростью  $\sim 0, 1 - 0, 4$  км/с (Рис. 8a). Рост отрицательных

ных значений  $\Delta H$  в YON может быть вызван усилением частично-кольцевого тока во внутренней магнитосфере в послеполуденном-ночном секторе, замыкающегося через продольные токи с восточной авроральной электроструей [Соловьев и др., 2009].

### О влиянии DCF-токов на вариации Dst

Показано, что рост динамического давления солнечного ветра (Pd) приводит к положительным вариациям  $\Delta H$ -компоненты поля низкоширотных геомагнитных возмущений только при положительных значениях  $B_z$  ММП ( $B_z > 0$ ). В периоды отрицательных значений  $B_z$  ММП ( $B_z < 0$ ) при росте Pd регистрируются отрицательные значения  $\Delta H$  на низких широтах. На Рис. 8b положительные импульсы  $\Delta H$  на низкоширотной станции YON ( $\Phi \approx 12^{\circ}$ ) обозначены буквами A, E, B, Г. Импульсам А, Б и В соответствовали всплески Pd, и импульсы А и Б регистрировались при положительных значениях  $B_z$  ММП, а импульс В – при уменьшении отрицательных значений В<sub>z</sub> ММП. Усиление отрицательных значений  $B_z$  ММП после 1130 UT привело к отрицательным вариациям  $\Delta H$  до ~1430 UT. Импульс Г был вызван ростом суббуревой активности (Рис. 8а).

Приведенные данные показывают, что в периоды  $B_z < 0$  на магнитопаузе возникают токи западного направления, компенсирующие или превышающие по интенсивности токи восточного направления. Одним из источников западного тока на магнитопаузе может быть усиление интенсивности продольных токов области 1 при  $B_z < 0$ . [Соловьев и dp., 2009].

### Заключение

Измерения геомагнитного поля на территории Якутии проводятся в течение почти 80 лет, за этот период на-

коплен большой архив данных. Экспериментальная база ИКФИА СО РАН в совокупности с глобальной сетью магнитных станций может использоваться как для измерений геомагнитного поля, так и для прогноза "космической погоды" – состояния околоземного космического пространства.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-05-98546 и № 11-05-00908 и проекта № 69 СО РАН.

### Литература

- Баишев, Д. Г., Г. В. Борисов, В. А Величко, С. И. Соловьев, К. Юмото (2004), Проявления внезапного начала большой магнитной бури 20 ноября 2003 г. в генерации импульса SC, пульсаций Psc и пространственной модуляции яркости аврорального свечения, Космические исследования, 42, 6, 608– 615.
- Соловьев, С. И., Р. Н. Бороев, А. В. Моисеев, А. Ду, К. Юмото (2008), Влияние авроральных электроструй и параметров солнечного ветра на вариации интенсивности низкоширотных геомагнитных возмущений и *Dst* в периоды экстремально большой магнитной бури 20–21 ноября 2003 г., *Геомагнетизм и аэрономия, 48*, 3, 306–319.
- Соловьев, С. И., Р. Н. Бороев, А. В. Моисеев, Г. В. Борисов, К. Юмото (2009), Динамика ионосферных электрических токов и границ аврорального свечения в периоды сильных магнитных бурь, *Геомагнетизм и аэрономия*, 49, 4, 472– 482.
- Турпанов, А. А., С. А. Стародубцев (2010), Программное обеспечение для работы с базой данных космических лучей, Вычислительные технологии, 15, 2, 103–110.
- Moiseyev, A. V., S. I. Solovyev, R. N. Boroyev, V. A. Mullayarov, S. N. Samsonov, A. Du (2010), Peculiarities of sudden commencement manifestation in VLF-emission generation and cosmic noise absorption, Proc. of the 9th Intern. Conf. "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Sep. 20–24, 2010.
- Yumoto, K., and the 210°MM Magnetic Observation Group (1996), The STEP 210°magnetic meridian network project J. Geomag. Geoelectr., 48, 1297–1309.

Г. А. Макаров, А. В. Моисеев и Н. И. Неустроев, Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН.