

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.010

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АЛТАЕ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОЙ СТАНЦИИ «БАЙГАЗАН»

А.Ю. Гвоздарев

*Горно-Алтайский государственный университет;*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

**Аннотация.** По данным магнитной станции «Байгазан» проведена оценка скорости изменения горизонтально ориентированных компонент геомагнитного поля  $dV/dt$  на Алтае. Показано, что для микропульсаций класса Pc5 оптимальный шаг для расчёта  $dV/dt$  методом центральных разностей составляет 5-10 с. Распределение  $dV/dt$  является логнормальным, но имеет тяжелый «хвост», связанный с геомагнитными возмущениями. Выделены эпизоды превышения порога 30 нТл/мин среднеминутными значениями  $dV/dt$  за 2012 г. – они в основном связаны со внезапными началами бурь. Порог в 20 нТл/мин превышает также в случае развития микропульсаций классов Pc5/Pi3 и Pc3.

### Введение

В последние годы появилось большое количество работ, посвященных исследованию геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в средних и низких широтах [1,2]. Скорость изменения горизонтально ориентированной компоненты поля  $dV/dt$  сильнее всего скоррелирована с ГИТ [3], поэтому именно изучению этого показателя придается большое значение. В приближении однородной проводимости земной коры геоэлектрическое поле прямо пропорционально временной производной магнитного поля. Было показано, что  $dV/dt$  подчиняется логнормальному распределению [3]. В средних широтах статистические свойства скорости изменения горизонтальной составляющей изучались в [4] на основе данных магнитных обсерваторий Новосибирск, Иркутск и Алта-Ата за семь интервалов высокой геомагнитной активности в 2003-2005 гг. Авторами было показано, что максимальные значения скорости изменения поля наблюдались во время внезапных начал магнитных бурь (SSC). В качестве порогового значения, способного негативно воздействовать на технические системы, задавалась скорость изменения поля 30 нТл/мин. Превышение этого порога наблюдалось только при 8-бальных бурях и в октябре 2003 г. при 9-бальной буре, время превышения составило 445 минут в Новосибирске и 148 минут в Алта-Ате.

В настоящей работе приводятся результаты исследования этого показателя ( $dV/dt$ ) по данным магнитной станции Горно-Алтайского университета «Байгазан» на территории Республики Алтай. Магнитная станция расположена на одноименном кордоне Алтайского заповедника, что позволяет обеспечить низкий уровень шумов (среднеквадратичное отклонение для секундной выборки не более 0.01 нТл).

### Методика исследований и результаты анализа

Для анализа использовались данные кварцевого вариометра, установленного на станции «Байгазан», с частотой регистрации 5 Гц [5]. Скорость изменения компонент поля рассчитывалась как конечная разность, например, для горизонтальной компоненты  $H$

$$\frac{dH}{dt}(t) = \frac{H(t + \delta t/2) - H(t - \delta t/2)}{\delta t}$$

где  $\delta t$  – шаг сетки. При этом учитывался тот факт, что погрешность  $\Delta$  в определении производной  $dH/dt$  из значений компоненты геомагнитного поля  $H(t)$  на основе расчёта центральной разности определяется третьей производной от значений компоненты  $d^3H/dt^3$ , шагом сетки  $\delta t$  и погрешностью секундных средних  $\delta H$  [6]

$$\Delta = \frac{d^3H}{dt^3} \frac{\delta t^2}{6} + \frac{2\delta H}{\delta t} = \omega^3 A \frac{\delta t^2}{6} + \frac{2\delta H}{\delta t}$$

Последнее выражение записано для случая микропульсаций, которые с довольно большой точностью можно описывать как гармонические колебания с амплитудой  $A$  и циклической частотой  $\omega$ . Тогда оптимальное значение шага сетки для расчёта производной  $dH/dt$  [6]

$$\delta t_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{6\delta H}{d^3H/dt^3}} = \frac{1}{\omega} \sqrt[3]{\frac{6\delta H}{A}}$$

При погрешности 0.01 нТл, периоде 300 с и амплитуде 10 нТл получаем  $\delta t_{\text{опт}} = 8.6$  с. Зависимость погрешности расчёта от шага сетки показана на рис.1. Если взять в качестве шага сетки 10 с, то погрешность расчёта производной при рассмотренных выше параметрах составит 4 пТл/с, то есть около 2% от амплитуды сигнала (отношение сигнал/погрешность составит 18 дБ).

Для расчётов использовались часовые отрезки данных, при помощи команды MATLAB reshape() из каждого отрезка формировалась матрица из 360 столбцов. При этом столбцы отстояли друг от друга по времени на 10 сек. Затем при помощи команды diff(), рассчитывались конечные разности между соседними столбцами. После обратного преобразования матрицы получался ряд из оценок производной компонент ( $dH/dt$ ,  $dD/dt$ ,  $dZ/dt$ ) с минимальной погрешностью, но с шагом по времени, равным шагу загружаемых данных. По ним рассчитывалась скорость изменения горизонтальной ориентированной компоненты поля  $dB/dt = \sqrt{(dH/dt)^2 + (dD/dt)^2}$ . Время привязки этих данных начиналось с 5й секунды часа и завершалось за 5 секунд до конца часа, т.к. при операции diff() формировался массив из 359 столбцов – то есть ряд был на 10 секунд короче исходных данных.

Разработанный алгоритм позволяет наиболее точно оценить скорость изменения поля в частотном диапазоне наиболее эффективно возбуждающих ГИТ микропульсаций. Как видно из рис. 1, оценки, полученные на минутной или секундной сетке, будут менее точными (примерно на порядок), расчёты на исходных данных будут иметь погрешность, сопоставимую с сигналом.

Для каждого часа рассчитывались среднеминутные значения модулей  $dB/dt$ ,  $dH/dt$ ,  $dD/dt$ , потом из них формировались матрицы 24x60 значений, которые сохранялись в специальные файлы. Потом эти файлы аккумулировались и на их основе строились распределения исследуемых величин за год. Пример распределения за 2012 г. показан на рисунке 2. При параметрах логнормального распределения, приведенных в заголовке рисунка, вероятность скорости изменения поля выше 30 нТл/мин ( $\lg(dB/dt)=1.48$ ) составляет

$$\text{erfc}\left(\frac{1.48 + 0.19}{0.36}\right) = 8.66 \cdot 10^{-11}$$

то есть одно событие должно происходить раз в 367 лет. Однако, как мы видим, такая скорость наблюдалась в течение 8 минут за 2012 год во время SSC 24 января, 8 марта, 16 июня (а также последующей геомагнитной активности), 14 июля. Следовательно, эмпирическое значение вероятности такого события составляет  $1.5 \cdot 10^{-5}$ , что на 5 порядков выше ожидаемого. Таким образом, распределение хоть и похоже на логнормальное, но обладает «тяжелым хвостом», который формируется во время внезапных начал магнитных бурь и, возможно, внезапных импульсов.

Также отбирались моменты времени со скоростями изменения магнитного поля выше 20 нТл/мин и 30 нТл/мин (см. таблицу). Для каждого часа, содержащего такие события, строились графики вариаций

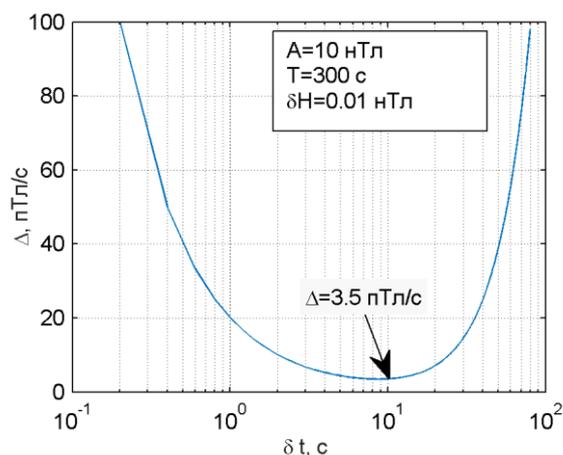


Рисунок 1. Зависимость погрешности расчёта  $dH/dt$  от шага сетки.

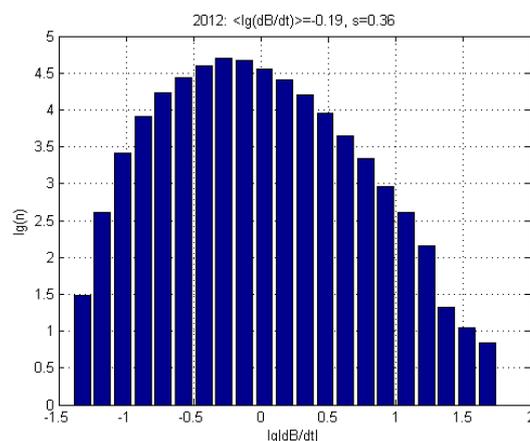


Рисунок 2. Распределение  $\lg(dB/dt)$  за 2012 г. на Алтае. Среднее значение и дисперсия показаны в заголовке.

компонент ГМП, временных производных и спектры по Уэлчу от временных производных. Примеры приведены на рис. 3.

**Таблица.** Моменты времени в 2012 г., когда среднeminутная скорость изменения поля на Алтае превысила 20 нТл/мин. Жирным шрифтом выделены случаи превышения порога 30 нТл/мин.

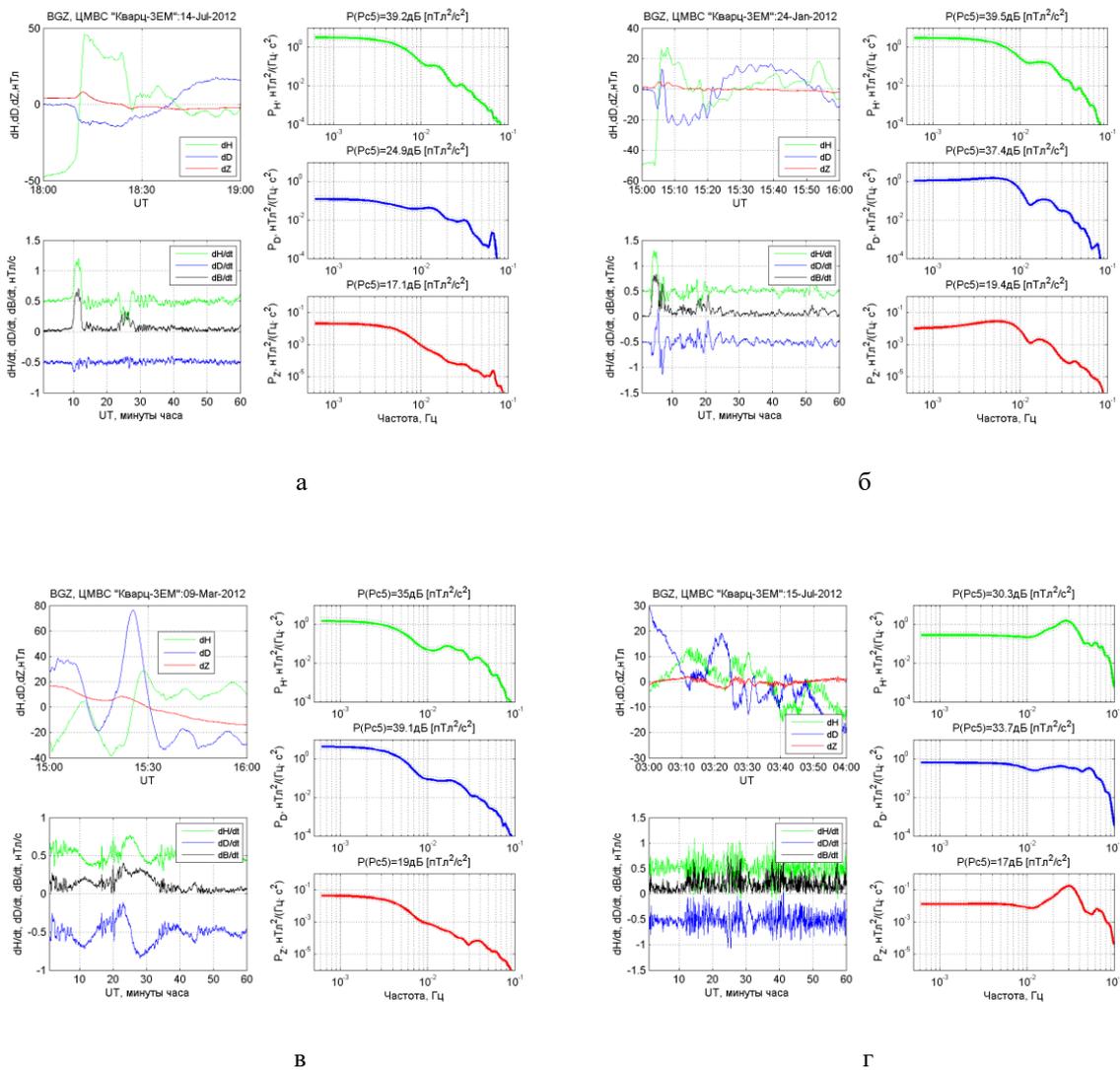
Год/месяц /день	время	dB/dt	dH/dt	dD/dt	примечание	Год/месяц /день	время	dB/dt	dH/dt	dD/dt	примечание
12/01/22	08 36	20.51	18.77	8.26		<b>12/06/16</b>	22 40	27.70	25.41	11.03	
<b>12/01/24</b>	<b>15 04</b>	<b>42.31</b>	<b>41.06</b>	<b>10.23</b>	<b>SSC 15:03</b>		22 42	20.82	15.76	13.61	
	<b>15 05</b>	<b>40.23</b>	<b>33.07</b>	<b>22.91</b>			22 43	22.07	14.60	16.56	
	15 07	23.63	9.34	21.70			22 47	27.66	24.99	11.87	
<b>12/03/08</b>	<b>11 03</b>	<b>32.23</b>	<b>28.19</b>	<b>15.62</b>	<b>SSC 11:03</b>		<b>22 49</b>	<b>32.96</b>	<b>31.78</b>	<b>8.72</b>	
	11 25	20.01	16.56	11.25			<b>22 50</b>	<b>37.67</b>	<b>30.93</b>	<b>21.51</b>	
	11 30	20.52	16.46	12.26		12/06/17	08 46	29.60	28.36	8.47	
	13 13	20.99	20.27	5.47		12/07/05	11 52	20.78	20.32	4.35	
12/03/09	15 23	20.76	10.07	18.16	Pc5	<b>12/07/14</b>	<b>18 10</b>	<b>30.18</b>	<b>29.54</b>	<b>6.21</b>	<b>SSC 18:09</b>
12/03/12	09 16	28.31	27.60	6.31	SSC 09:15		<b>18 11</b>	<b>36.45</b>	<b>36.35</b>	<b>2.72</b>	
12/03/15	13 08	22.75	16.59	15.57	SSC 13:07	2012/07/15	01 13	20.08	16.59	11.32	Pc 3
12/04/26	03 15	20.03	14.25	14.08			03 25	20.17	13.37	15.11	
12/05/22	03 44	20.14	7.86	18.54			05 14	20.30	11.59	16.66	
<b>12/06/16</b>	21 15	22.40	21.88	4.81	SSC 21:15		05 32	20.04	16.42	11.50	
	<b>22 16</b>	<b>30.87</b>	<b>27.63</b>	<b>13.77</b>							

Как видно из таблицы, скорости изменения поля выше 30 нТл/мин обычно наблюдались при SSC (информация об SSC бралась в Международном центре данных в Москве <http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com/ssc.dat>). При этом отмечается быстрое изменение горизонтальной компоненты, которое должно приводить к генерации ГИТ в широтно-ориентированных линиях. Однако, зачастую спустя некоторое время за счет развития волновых процессов в магнитосфере, высокие скорости изменения наблюдаются уже в обеих компонентах. Особенно показателен пример 16 июня, когда реакция на SSC была не очень сильной, а самые высокие скорости изменения поля наблюдались спустя час после SSC (см. таблицу).

Случаи со скоростью изменения поля выше 20 нТл/мин уже далеко не всегда привязаны к SSC, и здесь мы наблюдаем большее разнообразие сценариев. В частности, большая амплитуда наблюдается в скорости изменения восточной компоненты гораздо чаще и бывают случаи (24 января, 9 марта, 22 мая), когда она преобладает. В этом случае должны генерироваться ГИТ в линиях, ориентированных вдоль меридиана. Кроме случаев возбуждения высоких скоростей изменения поля за счёт волновой активности Pc5/Pi3 (см. рис. 3б,в), описанных в литературе [7], также высокие скорости изменения поля могут достигаться за счёт Pc3-волн (рис.3г). Действительно, при частоте 30 мГц, достаточно амплитуды 3 нТл, чтобы получить скорость изменения поля с амплитудой

$$dB/dt = 2\pi fA = 6.28 \cdot 0.03\text{Гц} \cdot 3\text{нТл} = 0.565\text{нТл/сек} = 33.9\text{нТл/мин}$$

Естественно, при анализе данных на основе минутных средних, активность Pc3-пульсаций невозможно оценить – видимо, поэтому в литературе нет упоминаний об этом типе процессов. Известно, что высокие скорости солнечного ветра находят свое отражение в высокоамплитудных Pc3-пульсациях. Заметим, что 15 июля 2012 г. это приводит к довольно длительному периоду высоких значений dB/dt – около 5 часов. На рисунке 3г видно, что скорость в 0.5 нТл/с достигается в течение часа многократно, однако длительность такого воздействия на электросети относительно короткая.



**Рисунок 3.** Примеры причин возникновения высоких скоростей изменения поля: а) SSC 14.07.2012 б) SSC и возбуждение волновой активности 24.01.2012 в) волновой активности в Pc5-диапазоне 09.03.2012 г) волновой активности в Pc3-диапазоне 15.07.2012.

### Заключение

По данным магнитной станции «Байгазан» проведена оценка скорости изменения горизонтально ориентированных компонент геомагнитного поля  $\frac{dB}{dt}$  на Алтае. Показано, что для микропульсаций класса Pc5 оптимальный шаг для расчёта  $\frac{dB}{dt}$  методом центральных разностей составляет 5-10 с. Распределение  $\frac{dB}{dt}$  является логнормальным, но имеет тяжелый «хвост», связанный с геомагнитными возмущениями. Выделены эпизоды превышения порога 30 нТл/мин среднеминутными значениями  $\frac{dB}{dt}$  за 2012 г. – они в основном связаны со внезапными началами бурь. Порог в 20 нТл/мин превышает также в случае развития микропульсаций классов Pc5/Pi3 и Pc3.

### Благодарности

Работа выполнена за счёт средств гранта РФФ 23-27-10055 и Министерства образования и науки Республики Алтай.

## Литература

1. Пилипенко, В.А.: Воздействие космической погоды на наземные технологические системы, Солнечно-земная физика, 7 (3), 72-110, <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>, 2021.
2. Gil, A., Berendt-Marchel, M., Modzelewska, R., Siluszyk, A., Siluszyk, M., Wawrzaszek, A., Wawrzynczak, A.: Review of geomagnetically induced current proxies in mid-latitude European countries, Energies, 16, 7406, <https://doi.org/10.3390/en16217406>, 2023.
3. Воробьев, А.В., Пилипенко, В.А., Сахаров, Я.А., Селиванов, В.Н.: Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов, Солнечно-земная физика, 5 (1), 48-58, <https://doi.org/10.12737/szf-51201905>, 2019.
4. Водяников, В.В., Гордиенко, Г.И., Нечаев, С.А., Соколова, О.И., Хомутов, С.Ю., Яковец, А.Ф.: Наведенные токи в линиях электропередач по данным геомагнитных вариаций, Геомагнетизм и аэронавигация, 46 (6), 853-859, 2006.
5. Бакиянов, А.И., Бетёв, А.А., Гвоздарев, А.Ю., Учайкин, Е.О.: Новая магнитная станция - Байгазан (Горный Алтай, Телецкое озеро), Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей, УрО РАН, Екатеринбург, 29-32, 2011.
6. Самарский, А.А., Гулин, А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов, Наука, Москва, 1989.
7. Сахаров, Я.А., Ягова, Н.В., Пилипенко, В.А.: Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи, Известия Российской академии наук. Серия физическая, 85(3), 445-450, <https://doi.org/10.31857/S0367676521030236>, 2021.