

ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОТ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Ю. И. Зецер, Б. Г. Гаврилов, В. А. Жмайло*, К. Г. Гайнуллин*,
В. И. Селин*

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, zetzer@idg.chph.ras.ru

*РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Рассмотрены геомагнитные вариации на поверхности Земли, определяемые магнитогиродинамической стадией расширения плазменного образования высотных ядерных взрывов. Показано, что распределение амплитуд сигналов по расстояниям от источника подчиняется определенной закономерности. Анализ данных измерений и численное моделирование магнитогиродинамического сигнала подтвердили, что временная форма и фазы сигнала определяются его распространением по трем каналам: электромагнитной волной в атмосфере, по высокопроводящим слоям ионосферы и по литосфере, обладающей конечной электропроводностью. Показано соответствие результатов численного моделирования и измерений. Сопоставление возмущений, вызываемых взрывами и суббуриями, свидетельствует о трудностях их разделения в дальней зоне взрыва.

Ключевые слова: высотный взрыв, магнитогиродинамическая волна, атмосфера, литосфера, ионосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к геофизическим эффектам, которые могут быть вызваны высотным ядерным взрывом (ЯВ), объясняется тем, что такой взрыв — единственное рукотворное явление, энергия и масштаб которого сопоставимы с наиболее мощными естественными возмущениями магнитосферно-ионосферной системы: магнитными бурями, суббуриями, полярным сиянием, образованием и разрушением радиационных поясов, генерацией ионосферных и земных токовых систем [1–6]. Исследование механизмов магнитосферно-ионосферных возмущений и их взаимосвязи является актуальной, но сложной научно-технической задачей. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последнее десятилетие в этой области, построение целостной физической картины магнитосферно-ионосферных электродинамических процессов пока невозможно. Для разработки адекватных физико-математических моделей этих процессов необходимо получение большого объема синхронных измерительных данных в гигантском диапазоне расстояний от Земли на границах и в хвосте магнитосферы, полярных каспах и т. д. Лабораторное моделирование и проведение активных плазменных экспериментов в космосе (см., например, [7, 8]) дает важные, но, естественно, не полные данные. В то же время исследование геофизиче-

ских эффектов высотных ЯВ, проведенных в 1960-е годы в США и СССР, способно расширить наши представления о физических процессах в системе атмосфера — ионосфера — магнитосфера Земли. В определенном смысле высотные ЯВ можно рассматривать как активные геофизические эксперименты, в ходе которых осуществлялось воздействие на геофизическую среду источниками, параметры которых достаточно хорошо известны.

Советский Союз и США провели в общей сложности около 15 высотных ядерных взрывов в разных точках Земли. В регистрации вызванных ими эффектов принимали участие многие страны и научные организации. В Советском Союзе огромная роль в организации таких исследований и разработке физических моделей и механизмов эффектов ядерных взрывов во всех средах принадлежит академику М. А. Садовскому. Разработанные под его руководством методы геофизических наблюдений и полученные уникальные научные материалы не теряют своего значения до сегодняшнего дня.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Высотные ЯВ мощностью от единиц кило тонн до нескольких мегатонн, что соответствует энергии плазменных образований $\approx 10^6 \div 10^{11}$ МДж, были проведены в диапазоне высот $10 \div 480$ км. В табл. 1 представлены основные

Таблица 1

Параметры высотных ядерных взрывов

ЯВ	Координаты эпицентра				Высота, км	Эквивалент, кт	Дата
	Географические		Геомагнитные				
	Широта	Долгота	Широта	Долгота			
Эпицентр							
Orange	17° с.ш.	192° в.д.	14° с.ш.	257° в.д.	43	2 000 ÷ 4 000	12.08.1958
K5	50° с.ш.	70,0° в.д.	41° с.ш.	141° в.д.	60	300	01.11.1962
Teak	17° с.ш.	192° в.д.	14° с.ш.	257° в.д.	80	2 000 ÷ 4 000	01.08.1958
Выше слоя E							
K1	50° с.ш.	70° в.д.	45° с.ш.	138° в.д.	150	1,2	27.10.1961
K4	50° с.ш.	70° в.д.	45° с.ш.	138° в.д.	150	300	28.10.1962
K2	50° с.ш.	70° в.д.	45° с.ш.	138° в.д.	300	1,2	27.10.1961
K3	50° с.ш.	70° в.д.	45° с.ш.	138° в.д.	300	300	22.10.1962
Starfish	17° с.ш.	192° в.д.	14° с.ш.	257° в.д.	450	1 400	09.07.1962
Argus 1	38° ю.ш.	12° з.д.	36° ю.ш.	45° з.д.	480	1 ÷ 2	27.08.1958
Argus 2	50° ю.ш.	8° з.д.	45° ю.ш.	45° з.д.	480	1 ÷ 2	30.08.1958
Argus 3	50° ю.ш.	10° з.д.	44° ю.ш.	44° з.д.	480	1 ÷ 2	06.09.1958

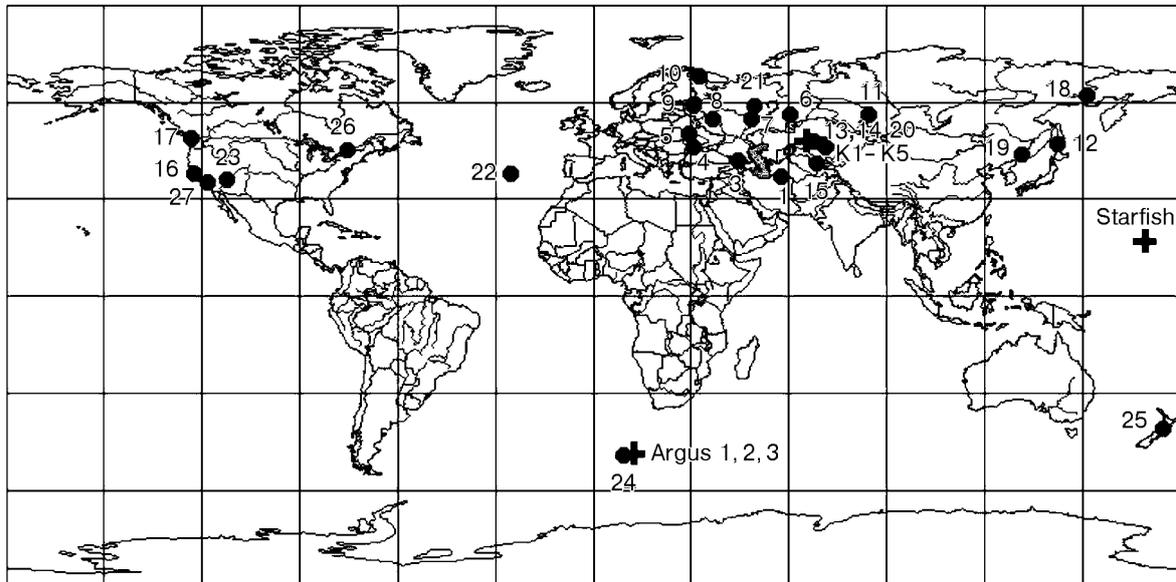


Рис. 1. Расположение высотных ядерных взрывов и пунктов регистрации магнитных возмущений:

1 — Ашхабад, 2 — Ташкент, 3 — Тбилиси, 4 — Одесса, 5 — Киев, 6 — Екатеринбург, 7 — Казань, 8 — Москва, 9 — Санкт-Петербург, 10 — Мурманск, 11 — Томск, 12 — Южно-Сахалинск, 13 — Энс 1, 14 — Энс 2, 15 — Энс 3, 16 — Пало Алто, 17 — Виктория, 18 — Средникан, 19 — Владивосток, 20 — Джеккаган, 21 — Киров, 22 — Азорские острова, 23 — Гранд-Каньон, 24 — Argus, 25 — Лоуэр Хат, 26 — Оттава, 27 — Редандо Бич

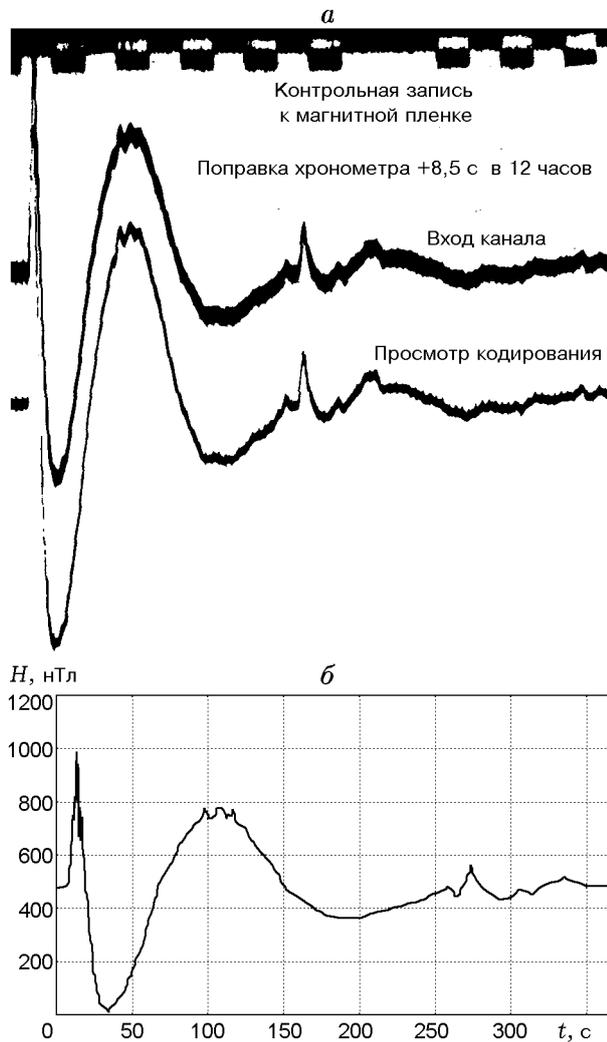


Рис. 2. Магнитограмма возмущения геомагнитного поля, зарегистрированного на станции Боровое, при взрыве на высоте 60 км (К5) (а) и его оцифровка (б)

данные о 11 советских и американских высотных ЯВ, а на рис. 1 и в табл. 2 [9] — данные о размещении и эпицентральных расстояниях пунктов регистрации геофизических полей на поверхности Земли. На карте (см. рис. 1) показаны положения эпицентров взрывов, упомянутых в табл. 1. Как видно из рисунка, измерения проводились на расстояниях от сотен до десятков тысяч километров от эпицентров соответствующих взрывов.

Для регистрации возмущений геомагнитного поля и земных токов использовалась аппаратура со скоростью развертки $20 \div 90$ мм/ч, с собственным периодом колебаний ≈ 2 с и раз-

решающей способностью по амплитуде $\approx 0,2 \times 10^{-5}$ Э. С помощью магнитометрической аппаратуры измерялись горизонтальная составляющая магнитного поля в направлениях север — юг (X) и восток — запад (Y), а также вертикальная составляющая (Z). По этим трем составляющим вычислялось полное магнитное поле: $F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$.

Надо отметить, что не на всех станциях удавалось добиться высокого качества регистрации. Из обработки нескольких десятков магнитограмм, полученных в дальней зоне в пунктах регистрации, перечисленных в табл. 2, установлены приведенные в табл. 3 максимальные вариации полного геомагнитного поля при различных взрывах.

На рис. 2 показан пример удачной регистрограммы возмущения геомагнитного поля, полученной на станции Боровое при взрыве на высоте 60 км (К5), а также его оцифровка. На рис. 3 и 4 представлены оцифрованные регистрограммы, полученные на станциях Алма-Ата и Борок при взрывах на высотах 150 км (К4) и 300 км (К3) соответственно.

Анализ результатов измерений наземными магнитометрами позволяет выделить некоторые типичные свойства зарегистрированных возмущений геомагнитного поля [5, 9, 10]:

- возмущения геомагнитного поля состоят из двух частей: начальной, представляющей собой короткопериодные колебания, и основной, представляющей собой длиннопериодные колебания;

- короткопериодные и длиннопериодные колебания регистрируются при взрывах на высотах более 100 км; при взрывах ниже 100 км регистрируются только длиннопериодные колебания;

- время прихода сигнала магнитного возмущения ($1 \div 2$ с от момента взрыва) слабо зависит от расстояния до точек регистрации, но связано с высотой взрыва;

- длительность основной фазы возмущения магнитного поля (длиннопериодные колебания) составляет $10 \div 30$ мин от момента взрыва.

Величины регистрируемых магнитных полей зависят от расстояний, на которых проводятся измерения, от высоты взрыва над поверхностью Земли, тротилового эквивалента взрыва, электропроводности подстилающей поверхности и т. д. Результаты наземных измерений возмущений геомагнитного поля обобщены

Таблица 2

Данные пунктов регистрации

№ п/п	Пункт регистрации	Расстояние до источника, км						
		K1	K2	K3	K4	K5	Starfish	Argus 3
1	Ашхабад	—	—	1 286	1 329	1 421	12 238	—
2	Ташкент	—	—	808	696	653	11 259	—
3	Тбилиси	—	—	1 854	2 036	2 151	12 728	—
4	Одесса	—	—	2 742	2 929	3 041	—	—
5	Киев	—	—	2 689	2 864	2 971	—	—
6	Екатеринбург	—	—	1 237	1 279	1 311	10 720	—
7	Казань	—	—	1 598	1 727	1 801	11 299	—
8	Москва	—	—	2 270	2 405	2 501	—	—
9	С.-Петербург	—	—	2 796	2 904	3 001	—	—
10	Мурманск	—	—	3 115	3 164	3 241	—	—
11	Томск	—	—	1 687	1 547	1 461	—	—
12	Южно-Сахалинск	—	—	5 578	5 412	5 290	5 518	—
13	Энск 1	—	—	355	183	222	—	—
14	Энск 2	—	—	527	248	103	—	—
15	Энск 3	—	—	648	367	215	—	—
16	Пало Алто	—	—	—	—	—	5 269	—
17	Виктория	—	—	—	—	—	5 419	—
18	Средникан	—	—	—	—	—	6 022	—
19	Владивосток	—	—	—	—	—	6 286	—
20	Джезказган	212	361	—	—	—	—	—
21	Киров	1 607	1 628	—	—	—	—	—
22	Азорские о-ва	—	—	—	—	—	—	10 211
23	Гранд-Каньон	—	—	—	—	—	—	13 908
24	Argus	—	—	—	—	—	—	480
25	Лоуэр Хат	—	—	—	—	—	6 560	—
26	Оттава	—	—	—	—	—	9 000	—
27	Редандо Бич	—	—	—	—	—	5 400	—

в работе [9]. На рис. 5 показана построенная по данным табл. 3 зависимость $F^2/Wd = f(R)$, где $Wd = (\mu B_0^2 \pi / 6) r^3$ — энергия эффективного магнитного диполя в точке взрыва; F — максимальная амплитуда изменения полного поля, измеренная в пункте регистрации; R — расстояние до точки взрыва; μ — магнитная проницаемость среды в области взрыва; B_0 — индукция геомагнитного поля в области взрыва;

r — размер эквивалентного магнитного диполя (измеренный максимальный радиус светящегося образования).

Как видно из рис. 5, зависимость возмущения геомагнитного поля, нормированного на энергию магнитного диполя, от расстояния до источника подчиняется определенной закономерности, которая при доверительной вероятности 95 % может быть выражена формулой

Таблица 3
Максимальные значения модуля геомагнитных вариаций
в пунктах регистрации

№ п/п	Пункт регистрации	$F_{\max}, 10^{-5} \text{ Э}$						
		K1	K2	K3	K4	K5	Starfish	Argus 3
1	Ашхабад	—	—	92	72	4	22	—
2	Ташкент	—	—	156	193	10	24	—
3	Тбилиси	—	—	102	31	1	36	—
4	Одесса	—	—	17	5	—	—	—
5	Киев	—	—	16	6	—	—	—
6	Екатеринбург	—	—	170	54	2	34	—
7	Казань	—	—	77	27	1	16	—
8	Москва	—	—	38	12	—	—	—
9	С.-Петербург	—	—	24	—	—	—	—
10	Мурманск	—	—	16	—	—	—	—
11	Томск	—	—	—	32	2	—	—
12	Южно-Сахалинск	—	—	4	2	0	157	—
13	Энск 1	—	—	2070	2120	65	—	—
14	Энск 2	—	—	580	1690	125	—	—
15	Энск 3	—	—	370	990	68	—	—
16	Пало Алто	—	—	—	—	—	50	—
17	Виктория	—	—	—	—	—	—	—
18	Средникан	—	—	—	—	—	51	—
19	Владивосток	—	—	—	—	—	43	—
20	Джезказган	20	118	—	—	—	—	—
21	Киров	—	4	—	—	—	—	—
22	Азорские о-ва	—	—	—	—	—	—	2
23	Гранд-Каньон	—	—	—	—	—	—	0
24	Argus	—	—	—	—	—	—	10
25	Лоуэр Хат	—	—	—	—	—	300	—
26	Оттава	—	—	—	—	—	11	—
27	Редандо Бич	—	—	—	—	—	50	—

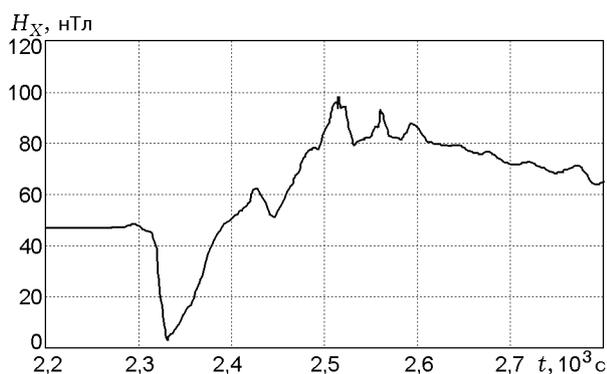


Рис. 3. Магнитограмма возмущения геомагнитного поля, зарегистрированного на станции Алма-Ата, при взрыве на высоте 150 км (K4)

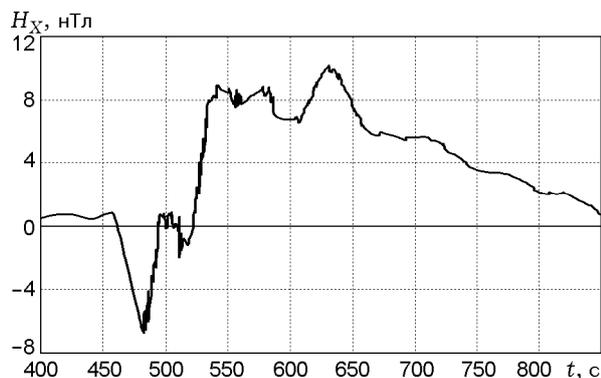


Рис. 4. Магнитограмма возмущения геомагнитного поля, зарегистрированного на станции Борок, при взрыве на высоте 300 км (K3)

$F^2/W_d = 4,5 \cdot 10^{-17}/R^{3,1}$ [$\text{Э}^2/\text{эрг}$]. При этом коэффициент линейной регрессии (для билогарифмического масштаба графика) составляет 0,8. Обращает на себя внимание тот факт, что компактность расположения данных сохраняется и для расстояний, превышающих расстояния прямой видимости из точки взрыва (2000 ÷ 2500 км).

На рис. 6 приведены времена прихода сигнала относительно момента взрыва [9], измеренные в наземных пунктах расположения магнитометров. Отметим, что эти времена в основном зависят от высоты взрыва h , слабо зависят от мощности взрыва и практически не изменяются с расстоянием от эпицентра.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ МГД-ИМПУЛЬСА ВЫСОТНОГО ЯВ

Как показано в предыдущем параграфе,

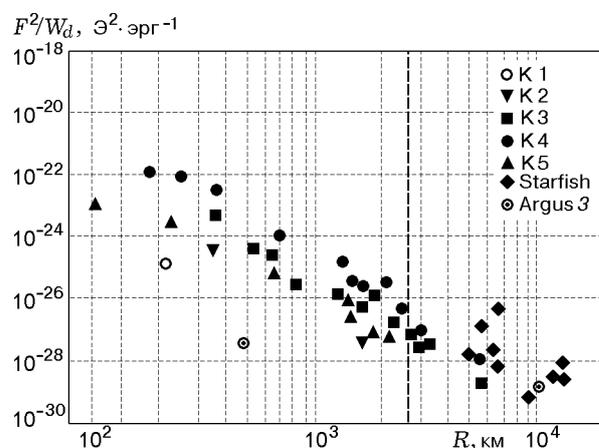


Рис. 5. Возмущение геомагнитного поля, нормированное на энергию магнитного диполя, в зависимости от расстояния до источника:

вертикальная штриховая линия обозначает границу зоны прямой видимости из точек взрыва

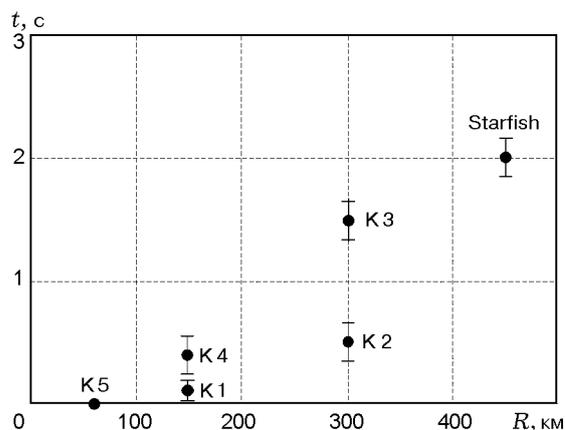


Рис. 6. Время прихода МГД-импульса на наземные измерительные пункты относительно момента взрыва

высотный ЯВ вызывает магнитное возмущение на поверхности Земли, параметры которого определяются мощностью взрыва, его высотой, расстоянием до источника и ориентацией относительно точки регистрации и местного магнитного поля. Временная запись возмущения имеет бухтообразную форму, напоминающую вариации геомагнитного поля, вызванные магнитными бурями и суббурями.

На рис. 7 приведена типичная запись возмущений магнитного поля на поверхности Земли в средних широтах (геофизическая станция ИДГ РАН Михнево в 80 км на юг от Москвы)

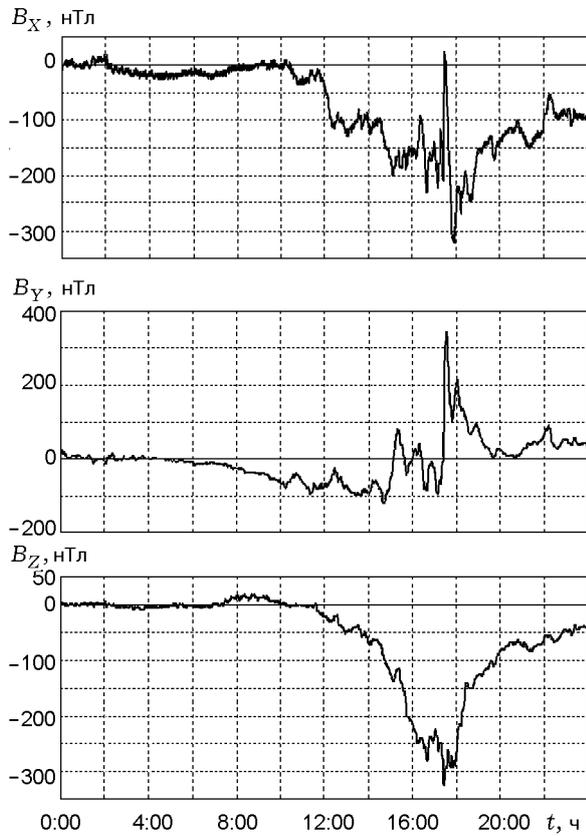


Рис. 7. Вариации магнитного поля на геофизической станции ИДГ РАН Михнево в период умеренной магнитной бури 11 февраля 2004 г.

в период магнитной бури средней мощности. Длительность «бухты» составляет несколько часов, а амплитуда — сотни нанотесла. Очевидно, что возмущения при магнитных бурях имеют, как правило, большую длительность, что определяется масштабом события. В то же время на таких записях могут быть выделены события с параметрами, близкими к зарегистрированным при высотных ЯВ.

Одним из широко используемых индексов, характеризующих магнитные бури, является индекс D_{st} , представляющий собой максимальное отклонение магнитного поля от спокойного уровня на контрольной цепочке магнитных станций. Поле D_{st} складывается из поля DCF токов, текущих вдоль поверхности магнитосферы Земли (ими определяется положительная вариация начальной фазы), поля кольцевого тока DR и поля DP токов, текущих в ионосфере и наиболее существенных в полярных районах: $D_{st} = DCF + DR + DP$. На рис. 8 при-

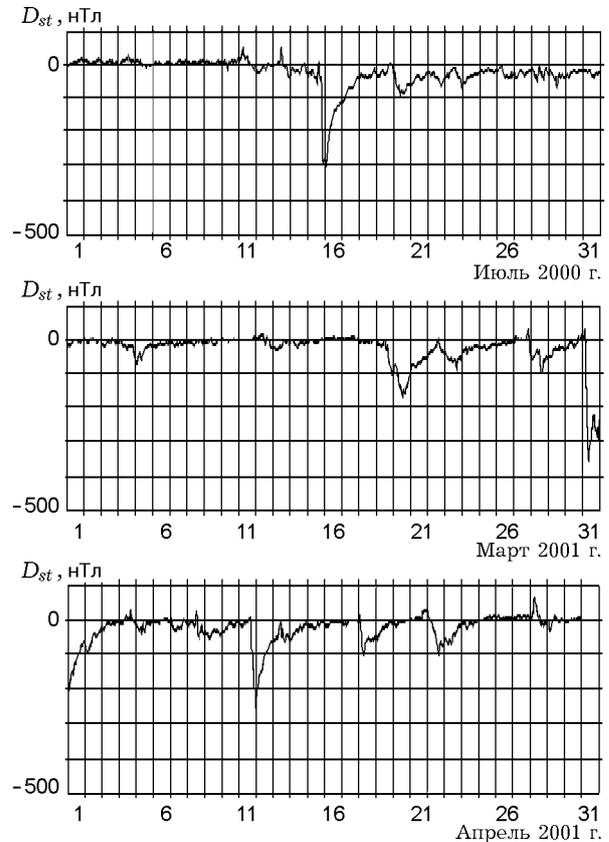


Рис. 8. Значения индекса D_{st} , зарегистрированные в июле 2000 г. и марте, апреле 2001 г.

ведены данные по изменению значения индекса D_{st} для трех месяцев, включающих сильные магнитные бури. Видно, что индекс D_{st} может достигать значений $400 \div 500$ нТл и превышать значение спокойного уровня в сотни раз. Из результатов измерений и расчетов магнитогеодинамического (МГД) сигнала высотного ЯВ мощностью $300 \div 500$ кт на высоте 300 км следует, что на расстояниях $1000 \div 2000$ км он вызывает эффект, аналогичный магнитной буре с $D_{st} = 100 \div 200$ нТл.

Анализ указанных факторов приводит к выводу, что характерные параметры МГД-импульсов, присущие высотным ЯВ, наблюдаются и в геомагнитных возмущениях, вызванных естественными причинами. Этот факт объясняется сходными физическими механизмами возникновения возмущений геомагнитного поля при магнитных бурях и высотных ЯВ и глобальным характером распространения возмущений при высотных ЯВ.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МГД-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Расчеты МГД-электромагнитного излучения (МГД-ЭМИ), сопровождающего высотный ЯВ, проводились в следующей постановке: на границе контрольной сферы, окружающей облако взрыва, задавались значения электрических полей (источник). Модель основывалась на расчетах расширения и подъема облака плазмы с постоянными скоростями. Рассматривался общий случай произвольных зависимостей расширения и подъема облака плазмы, а также диффузии внешнего магнитного поля внутрь облака.

Для нулевой (осесимметричной) гармоники возмущения по азимутальному углу φ индуцируется лишь азимутальная компонента электрического поля E_φ :

$$E_Z^0 = 0, \quad E_\rho^0 = 0, \quad E_\perp^0 = E_\rho^0 - iE_\varphi^0 = \\ = i \frac{3H_0 R^3(t)}{2cr^3(t)} \left(\frac{dR}{Rdt} - \frac{dr}{rdt} \right) \rho \cos \alpha.$$

Для первой гармоники возмущения по азимутальному углу φ индуцируются все компоненты электрического поля:

$$E_Z^1 = \frac{3H_0 R^3(t)}{2cr^3(t)} \left(\frac{dR}{Rdt} - \frac{dr}{rdt} \right) \rho \sin \alpha \sin \varphi,$$

$$E_\perp^1 = E_\rho^1 - iE_\varphi^1 = i \frac{3H_0 R^3(t)}{2cr^3(t)} \left[\left(\frac{dR}{Rdt} - \frac{dr}{rdt} \right) \times \right. \\ \left. \times (Z - Z_0 - S) - \frac{dS}{3dt} \right] e^{i\varphi} \sin \alpha.$$

Здесь $R(t)$ — зависимость радиуса облака плазмы, расширяющегося в магнитном поле $H_0 = 0,55$ Гс, составляющем угол $\alpha = 160^\circ$ с осью OZ . Центр облака поднимается по закону $S(t)$ из начальной точки на оси Z_0 . Отсюда следует, что в цилиндрической системе координат расстояние $r(t)$ от точки Z_0 до точки (ρ, Z) равно $r^2(t) = \rho^2 + (Z - Z_0 - S(t))^2$ и изменяется как $\frac{dr}{dt} = \frac{Z_0 - Z + S(t)}{r(t)} S(t)$.

В расчетах использовались следующие аппроксимационные зависимости:

$$R(t) = R_m [e^{-\gamma t} - e^{-\alpha t}] / k,$$

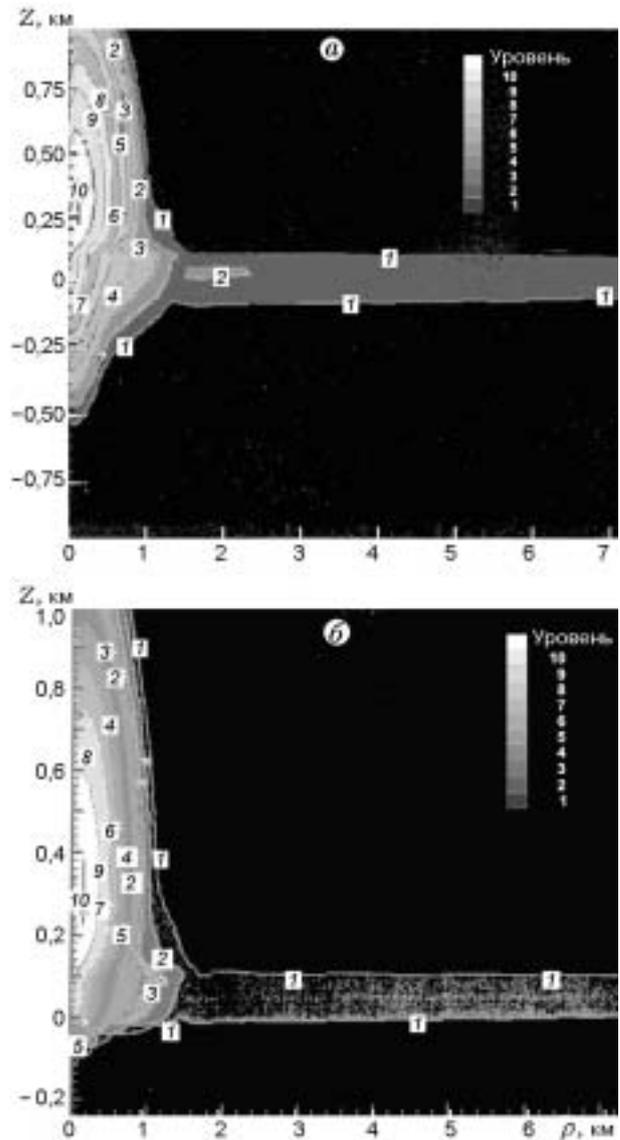


Рис. 9. Изолинии горизонтального электрического поля $|E_\perp|$ (отн. ед.) с десятикратным шагом в момент времени $t = 1$ с, отсчитанный от момента выхода волны возмущения на границу контрольной сферы вокруг источника, для характерных проводимостей однородного грунта 10^{-4} (а) и 10^{-2} См/м (б):

ось ординат — $Z = r \cdot 10^{-3}$ км,
ось абсцисс — $\rho = r \cdot 10^{-3}$ км

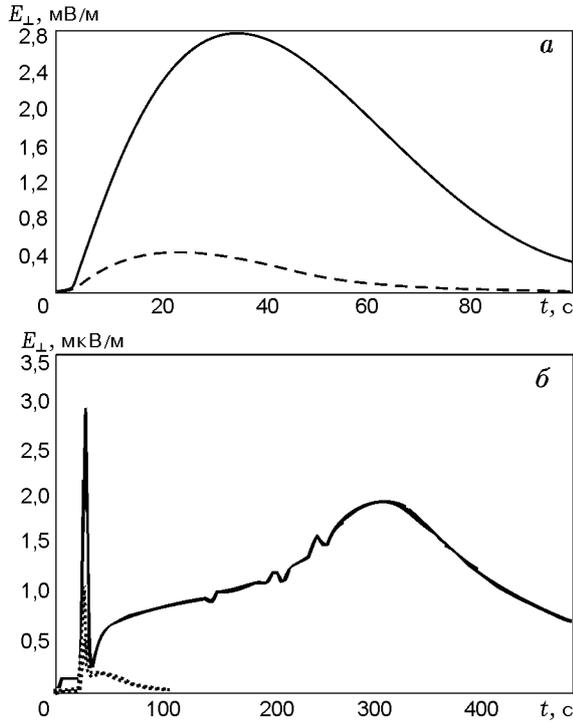


Рис. 10. Горизонтальное электрическое поле E_{\perp} на Земле на расстояниях 1 000 (а) и 7 000 км (б) от точки взрыва, проведенного на высоте 300 км (КЗ):

сплошная линия — $\sigma = 10^{-4}$ См/м, штриховая линия — $\sigma = 10^{-2}$ См/м

$$\dot{R}(t) = R_m[-\gamma e^{-\gamma t} + \alpha e^{-\alpha t}]/k,$$

$$k(\alpha, \gamma) = (\gamma/\alpha)^{\frac{\gamma}{\alpha-\gamma}} - (\gamma/\alpha)^{\frac{\alpha}{\alpha-\gamma}},$$

$$R_m = 150 \text{ км}, \quad \alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}, \quad \gamma = 0,003 \text{ с}^{-1},$$

$$S(t) = U_0[bt + e^{-bt} - 1]/b, \quad \dot{S}(t) = U_0(1 - e^{-bt}),$$

$$U_0 = 5 \text{ км/с}, \quad b = 0,3 \text{ с}^{-1}.$$

Приведенные формулы позволили рассчитать распространение горизонтальных компонент электрического поля E_{ρ} и E_{φ} в ионосфере, стратосфере и грунте и по ним определить горизонтальные компоненты магнитного поля B_{ρ} и B_{φ} без учета E_Z . Вертикальное магнитное поле B_Z рассчитывалось по формуле

$$B_Z(t) = -c \int_0^t \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\rho E_{\varphi}) - \frac{\partial E_{\rho}}{\partial \varphi} \right] dt.$$

На рис. 9 для характерных проводимостей однородного грунта $\sigma = 10^{-4}$ и 10^{-2} См/м

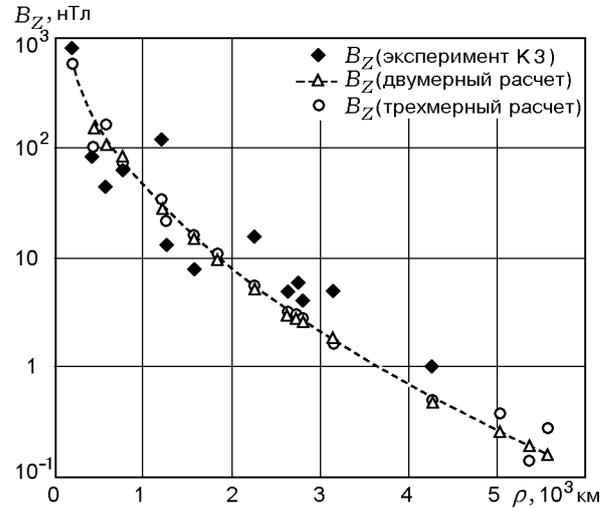


Рис. 11. Вертикальное магнитное поле B_Z на расстояниях ρ от источника

в координатах (ρ, Z) приведены результаты двумерных расчетов изолиний горизонтального электрического поля $E_{\perp}^2 = E_{\rho}^2 + E_{\varphi}^2$ (в относительных единицах) для взрывов на высоте 300 км (КЗ) с десятикратным шагом в момент времени $t = 1$ с, отсчитанный от момента выхода волны возмущения на границу контрольной сферы вокруг «источника». Характерное время пробега волны возмущения до сферы радиусом 180 км составляет ≈ 1 с от момента взрыва. В расчетах использована дневная модель ионосферы с однородной по высоте концентрацией электронов $N_e = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и частотой столкновения ионов, экспоненциально убывающей по высоте с шагом ≈ 10 км. Кривизна Земли в приведенных расчетах не учитывалась.

На рис. 10 представлена зависимость горизонтального электрического поля E_{\perp} от времени, рассчитанная для пунктов регистрации на поверхности Земли, находящихся на расстояниях 1 000 и 7 000 км от точки взрыва, проведенного на высоте 300 км (КЗ).

На рис. 11 показаны максимальные значения вертикальной компоненты магнитного поля, рассчитанные по данной программе для пунктов регистрации, расположенных на поверхности Земли на расстояниях ρ от источника. Здесь же приведены экспериментальные данные, полученные при взрыве на высоте 300 км (КЗ).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из приведенных данных измерений, МГД-импульс от высотного ЯВ наблюдается на расстояниях в десятки тысяч километров (см. рис. 5). Картина распространения представляется довольно сложной и определяется совместным действием ряда факторов. Так, в [5] высказано предположение о трех основных механизмах, определяющих возникновение и распространение МГД-сигнала. Это диамагнитный эффект плазмы продуктов взрыва (огненный шар), эффект кольцевых токов, определяемых захваченными заряженными частицами искусственных радиационных поясов, возникающих в магнитосфере после взрыва, и эффект кольцевых токов, определяемых усиливающейся ионизацией в E -слое ионосферы, создаваемой γ - и/или рентгеновским излучением взрыва. В [10] предложена модель генерации геомагнитных возмущений плазменным облаком и вторичным источником с резкими верхней и нижней границами гиротропной проводящей среды.

Анализ результатов расчетов (см. рис. 9) показывает, что после выхода в стратосферу волна возмущения быстро (со скоростью света) распространяется в промежутке ионосферы — Земля. Однако амплитуда этого возмущения мала по сравнению с основной фазой МГД-ЭМИ, наблюдаемого на Земле. Такое «мгновенное» распространение сигнала через $1 \div 2$ с после взрыва хорошо согласуется с фактом «одновременного» через $1,5 \div 2$ с начала регистрации МГД во всех пунктах наблюдения (см. рис. 6). Основная фаза сигнала распространяется по ионосфере и подстилающей земной поверхности.

Из рис. 10 видно, что момент начала первого пика t_1 полностью соответствует времени распространения сигнала по ионосфере ($t_1 = \rho/V_A$) с альфвеновской скоростью $V_A = H_0/\sqrt{4\pi M_i N_i}$ и не зависит от проводимости грунта (M_i — масса ионов, N_i — их концентрация). Амплитуда пика уменьшается с ростом электропроводности. Характерная длительность первого пика (главная фаза) в зависимости от точки наблюдения составляет $5 \div 40$ с, что также согласуется с данными наблюдений ($0,5 \div 30$ с).

Проникновение поля в грунт, напротив, определяется его электропроводностью σ (см. рис. 9). Из распределения изолиний видно, что при малом значении σ поле под эпицентром

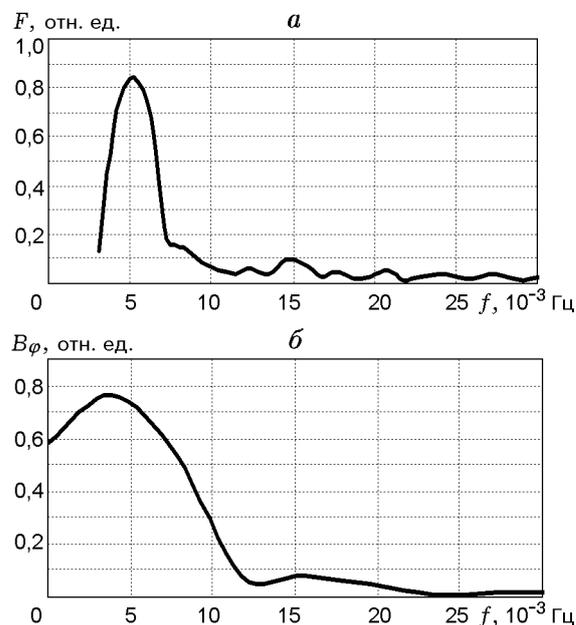


Рис. 12. Частотные спектры H -компоненты геомагнитного возмущения во время суббури 15 июля 2000 г. (а) и расчетный спектр сигнала от взрыва на высоте 300 км (КЗ) (б)

быстро и глубоко проникает в грунт, что соответствует значительной толщине скин-слоя (≥ 100 км). Далее оно диффундирует от эпицентра и достигает точек наблюдения на поверхности Земли. На рис. 10 время появления второго пика соответствует времени диффузии из эпицентра $t \approx \sigma \rho^2/c^2$ и определяет длительность всего импульса в дальней точке $\rho = 7000$ км до 500 с, что также согласуется с измерениями ($350 \div 450$ с в зависимости от точки наблюдения). Естественно, что амплитуда второго пика определяется величиной σ и в ряде случаев ее значение мало по сравнению с первым пиком. Из рис. 9 видно также, что проводимость грунта влияет не только на распространение поля в самом грунте (что достаточно очевидно), но и на поведение поля в районе источника на высотах взрыва.

Как видно из приведенных экспериментальных и расчетных материалов, изменения геомагнитного поля, вызванные высотным ЯВ, похожи на аналогичные изменения, вызванные естественными причинами: сильными магнитными бурями и суббуриями, в особенности в дальней зоне взрыва. Для сравнения естественных и вызванных ЯВ геомагнитных возмущений были выделены их основные парамет-

ры (максимальная амплитуда полного поля, амплитуды сигналов соответствующих компонент поля, частотный спектр, скорость нарастания первого вступления и др.). В качестве иллюстрации на рис. 12 показаны частотный спектр геомагнитного возмущения во время суббури 15 июля 2000 г. и расчетный спектр сигнала для взрыва на высоте 300 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высотные ядерные взрывы создают заметные возмущения геомагнитного поля, регистрируемые на поверхности Земли на расстояниях десятки тысяч километров от точки взрыва.

С помощью представления источника МГД-импульса в виде эффективного магнитного диполя появляется возможность сгруппировать все приведенные данные по высотному ЯВ в единую совокупность. Анализ этой совокупности показывает, что максимальная амплитуда возмущения геомагнитного поля, нормированного на энергию эффективного магнитного диполя в точке взрыва, спадает в зависимости от расстояния до точки взрыва по закону $\sim 1/R^3$.

Анализ экспериментальных данных и численного моделирования позволяет предположить наличие трех каналов распространения МГД-импульса высотного ЯВ, определяющих его временные фазы: 1) электромагнитной волной в нейтральной атмосфере, 2) по высокопроводящим слоям ионосферы и 3) по поверхности Земли, обладающей конечной электропроводностью.

Сопоставление возмущений геомагнитного поля на поверхности Земли, вызываемых высотными ЯВ и суббуриями, свидетельствует о трудностях разделения этих двух эффектов, особенно в дальней зоне взрыва. Наиболее характерное отличие естественных геомагнитных возмущений от возмущений, вызванных высотным ЯВ, состоит в том, что вступление

сигнала МГД-ЭМИ высотного ЯВ характеризуется достаточно крутым фронтом ($\approx 0,1 \div 1$ нТл/с), что практически не наблюдается при магнитных бурях и суббуриях [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ядерные** испытания СССР. Т. 2. М.: ИздАТ, 1997. С. 332.
2. **Операция** «Морская звезда»: Сб. статей. М.: Атомиздат, 1964.
3. **Операция** «Аргус»: Материалы симпоз. М.: Атомиздат, 1960.
4. **Nuclear Weapons Databook**. V. II. Appendix B: Known US Nuclear Tests: July 1945 — December 1985.
5. **Maeda H., Shirgaokar A. J., Yasuhara M.** On the geomagnetic effect of the starfish high-altitude nuclear explosion // *J. Geophys. Res.* March 1, 1964. V. 69, N. 5.
6. **Гаврилов Б. Г.** Изменение концентрации электронов в ионосфере, связанное с генерацией продольных токов при распространении крупных плазменных образований в магнитном поле // *Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли*. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 530–539.
7. **Erlandson R. E., Meng C.-I., Zetzer J. I., et al.** The APEX North Star experiment: observations of high-speed plasma jets injected perpendicular to the magnetic field // *Adv. in Space Res.* 2002. V. 29, issue 9. P. 1317–1326.
8. **Гаврилов Б. Г. и др.** Экспериментальное исследование взаимодействия высокоскоростных потоков космической плазмы с ионосферой и магнитосферой земли // *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 2. С. 171–172.
9. **Зецер Ю. И.** Вариации магнитного поля на поверхности Земли от расширяющегося плазменного облака высотного ядерного взрыва // *Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли*: Сб. тр. ИДГ. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 519–529.
10. **Горбачев Л. П. и др.** Генерация геомагнитных возмущений нестационарными источниками высокой энергии. М.: МИФИ, 2001.

Поступила в редакцию 16/VI 2004 г.