

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ,
ОБУСЛОВЛЕННЫХ МОЩНЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ ВЗРЫВОМ
В РАЙОНЕ НАРЫНСКОГО КАСКАДА
ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (КАМБАРАТА)**

В.Д. Брагин

В период с 20 по 25 декабря 2009 г. ИС РАН в г. Бишкеке выполнен комплекс электромагнитных наблюдений при проведении мощного промышленного взрыва (2.8 кТ) в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата).

Ключевые слова: электромагнитные наблюдения; электрическое поле; магнитное поле; электромагнитная станция; магнитовариационная станция; взрыв.

Введение. При проведении работ, связанных с прогнозом землетрясений в сейсмоактивных регионах, широко используются методы электромагнитного и геомагнитного мониторинга для фиксации аномальных вариаций электрических и магнитных характеристик земной коры, сопровождающих активизацию напряженно-деформационных полей, как правило, предшествующих землетрясениям. При проведении таких наблюдений используются теоретические предпосылки, накопленный опыт и результаты лабораторных исследований на образцах пород. Следует отметить, что результаты лабораторных исследований зачастую значительно отличаются от эффектов, наблюдаемых в натуральных условиях. Это связано как с разным пространственным

масштабом явлений, так и с разной энергетикой деформационных процессов в средах.

В 60 – 80-х годах прошлого века различными организациями АН СССР были предприняты попытки выполнить эксперименты в натуральных условиях с целью зафиксировать электромагнитные эффекты в земной коре с использованием в качестве источников мощные промышленные взрывы [1, 4–7, 10–12, 14, 15, 20].

При подземных взрывах и землетрясениях возникает комплекс разнообразных электромагнитных эффектов, имеющих различную физическую природу [2–10, 12, 13, 16–18, 20–23]. В настоящее время для адекватной интерпретации опытных данных разработана теория, позволяющая оценить влияние тех или иных явлений и

выявить преобладающий эффект [16, 22, 24, 25]. Электродинамические явления, связанные с деформацией и разрушением вещества, характерны как для подземных взрывов, так и для землетрясений.

Перечислим некоторые из упомянутых выше эффектов, которые можно наблюдать при мощном подземном взрыве в радиусе нескольких десятков километров. Вначале практически одновременно со взрывом регистрируется так называемый электромагнитный импульс (ЭМИ) взрыва, который представляет собой короткий сигнал длительностью около одной секунды. У этого сигнала может быть несколько причин. Это расширение сильно нагретой плазмы в подземной полости, радиационное возбуждение полей при ядерном взрыве, поляризация грунта в ударной волне, распространяющейся по среде [3–7]. Электрические токи, распространяющиеся по проводящей земле, вызывают возмущение геомагнитного поля [8–12]. Генерация токов при прохождении сейсмических волн мимо пункта наблюдения создаёт так называемые косейсмические явления. Следующая фаза электродинамических явлений при взрыве связана с выходом ударной волны на поверхность земли и образованием в атмосфере воздушной ударной волны. Сжатие воздуха в волне, распространяющейся вдоль поверхности земли, меняет концентрацию заряженных аэрозолей, что создаёт возмущение геоэлектрического поля в приземном слое атмосферы [13, 15, 17–19]. Атмосферная волна, распространяющаяся вверх, и достигающая нижней границы ионосферы, приводит к возбуждению ионосферной плазмы. Это возбуждение может распространяться в гиротропном E-слое ионосферы вдоль поверхности Земли, и может излучаться в магнитосферу в виде альвеновской и быстрой магнитозвуковой волн. Нередки случаи, когда на месте проведения взрыва сохраняются долговременные локальные аномалии электромагнитного поля Земли, сохраняющиеся в течение нескольких суток и даже месяцев. Эти явления могут быть связаны с необратимым разрушением среды взрывом, а также с эффектами ударного намагничивания и размагничивания магнетитсодержащих пород и металлических конструкций [21–25].

Один из возможных путей решения проблемы прогноза землетрясений связан с поиском электромагнитных предвестников землетрясений. Такие предвестники наблюдаются довольно часто, и к настоящему времени в этой области накоплен обширный экспериментальный мате-

риал. Однако совершенство методики измерений и увеличение чувствительности аппаратуры позволяют усомниться в достоверности многих данных, полученных в прошлые десятилетия [14].

Наблюдаемые в экспериментах электромагнитные явления возможно разделить на явления, обусловленные деформацией и разрушением твёрдых тел и сейсмомагнитным и сейсмоэлектрическим явлениям, возникающим при распространении сейсмических волн в проводящих слоях земли [16].

Следует отметить, что изучение эффектов от промышленных взрывов в атмосфере и ионосфере Земли были начаты раньше по специальным программам и были достаточно продуктивными ввиду их массового характера, наличия специализированной аппаратуры для их исследования.

Прежде для исследования эффектов в земной коре, вызванных взрывами, использовалась стандартная аналоговая электроразведочная аппаратура, не приспособленная для регистрации быстропротекающих процессов. Исследования были инициативными. По этим причинам они оказались малопродуктивными.

В настоящее время ситуация изменилась в лучшую сторону. Появились различные цифровые электромагнитные и магнитовариационные станции, позволяющие проводить подобные исследования на новом качественном уровне. Их отличает большой динамический диапазон, высокая чувствительность, широкий частотный диапазон. К таким аппаратным средствам можно отнести электромагнитные станции канадской фирмы “Phoenix”, цифровые электромагнитные станции ИС-2, отечественные магнитовариационные станции МВ-07, ММПОС-1, ММПОС-2, GSM-19Т канадской фирмы GEM Systems.

Методика электромагнитных наблюдений. Электромагнитные наблюдения выполнялись для выявления эффектов от взрыва в естественном электрическом поле Земли и возможного изменения верхней части геоэлектрического разреза в ближней зоне. Наблюдения выполнялись с использованием электромагнитной станции ИС-2, разработанной в ИС РАН и электроразведочным комплектом для МТ зондирований типа “Phoenix” в 5,7 км от пункта взрыва (см. рис. 1).

Дискретность наблюдений станцией ИС-1 составила 800 измерений в секунду в полосе 0 – 10 Гц, динамический диапазон – 140 дВ. С помощью станции выполнялась регистрация горизонтальных компонент естественного электриче-

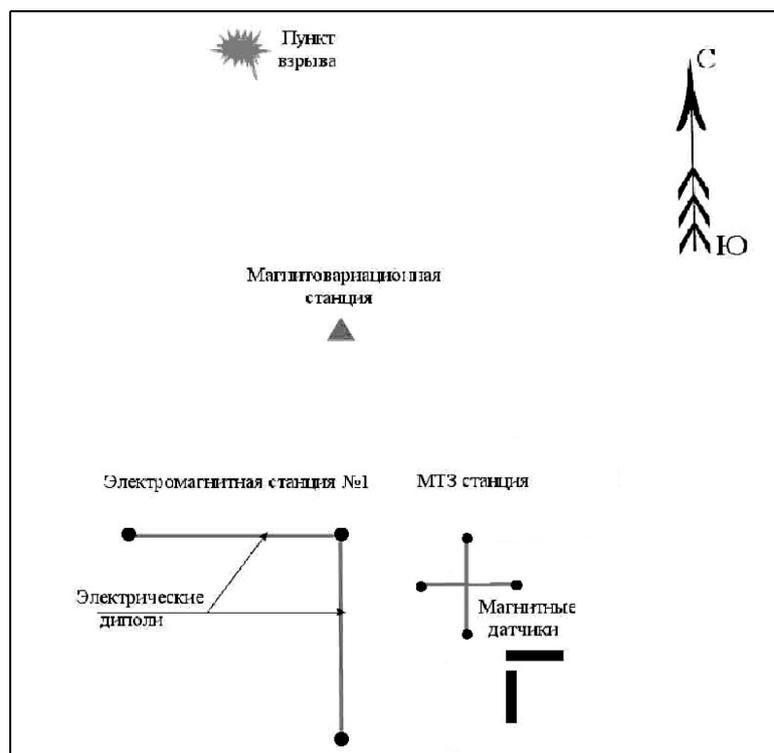


Рис. 1. Схема электромагнитных и геомагнитных наблюдений эффектов в земной коре от Камбаратинского взрыва 22 декабря 2009 г.

ского поля Земли (E_x и E_y). В качестве датчиков была использована система ортогональных электрических диполей длиной около 220 м. В качестве электродов использовались латунные стержни длиной 1 м. Третий канал станции использовался для регистрации огибающей вертикальной компоненты электромагнитного поля Земли. В этих целях вход измерительного канала был подсоединен к специальному широкополосному (30 КГц – 10 МГц) приемнику с пиковым детектором на выходе. Синхронизация часов станции выполнялась встроенным GPS приемником.

Дискретность наблюдений МТ станцией «Phoenix» составила 24 измерения в секунду в полосе частот 0-5 Гц, динамический диапазон – 140 dB. Синхронизация часов станции выполнялась встроенным GPS приемником. Выполнялась регистрация горизонтальных компонент электрического поля и трех компонент магнитного поля.

Результаты электромагнитных наблюдений. Сейсмические волны, распространяющиеся в земной коре, приводят к появлению ряда электромагнитных эффектов. Одно из таких явлений –

поляризация среды в ударной волне. Однако этот эффект имеет пороговый характер, и на дальних расстояниях от места взрыва, когда амплитуда волны уменьшается, начинают преобладать другие процессы, обусловленные, в частности, сейсмоэлектрическими явлениями или возмущениями геомагнитного поля при движении проводящих слоев земли. Все эти вопросы важны для прикладных геофизических исследований, поскольку изучение вариаций электромагнитного поля Земли, переносимых упругими волнами, даёт дополнительную информацию о глубине и энергии сейсмического источника и параметрах среды вдоль трассы распространения волны. Эта информация может быть использована при создании новых несейсмических методов верификации подземных ядерных взрывов и регистрации землетрясений. Это также важно для адекватной интерпретации данных (обычно УНЧ и ОНЧ диапазонов) магнитосферных станций по признаку происхождения полученных сигналов (магнитосферного или литосферного).

На рис. 2 и 3 представлены результаты регистрации эффектов от Камбаратинского взрыва в

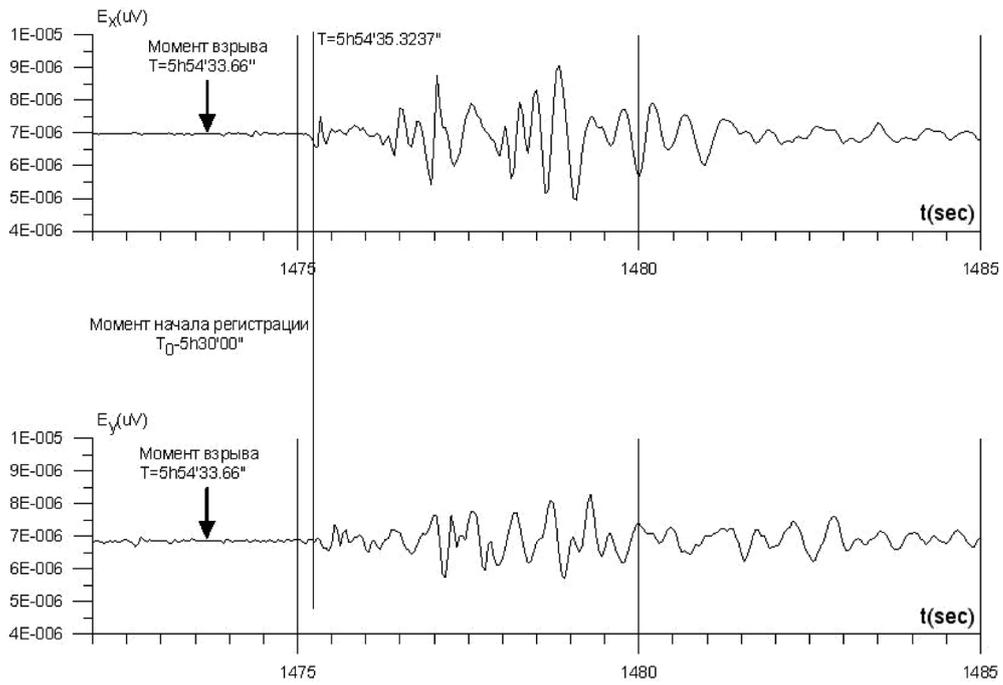


Рис. 2. Запись электрических компонент естественного электромагнитного поля Земли аппаратурой “Phoenix”.

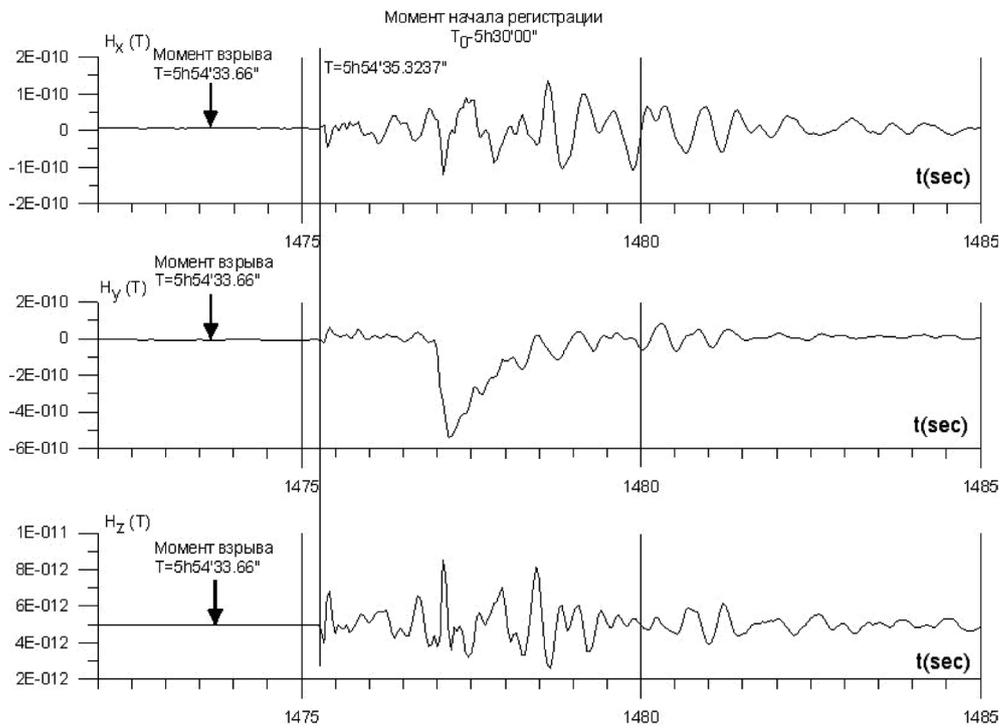


Рис. 3. Запись магнитных компонент естественного электромагнитного поля Земли аппаратурой “Phoenix”.

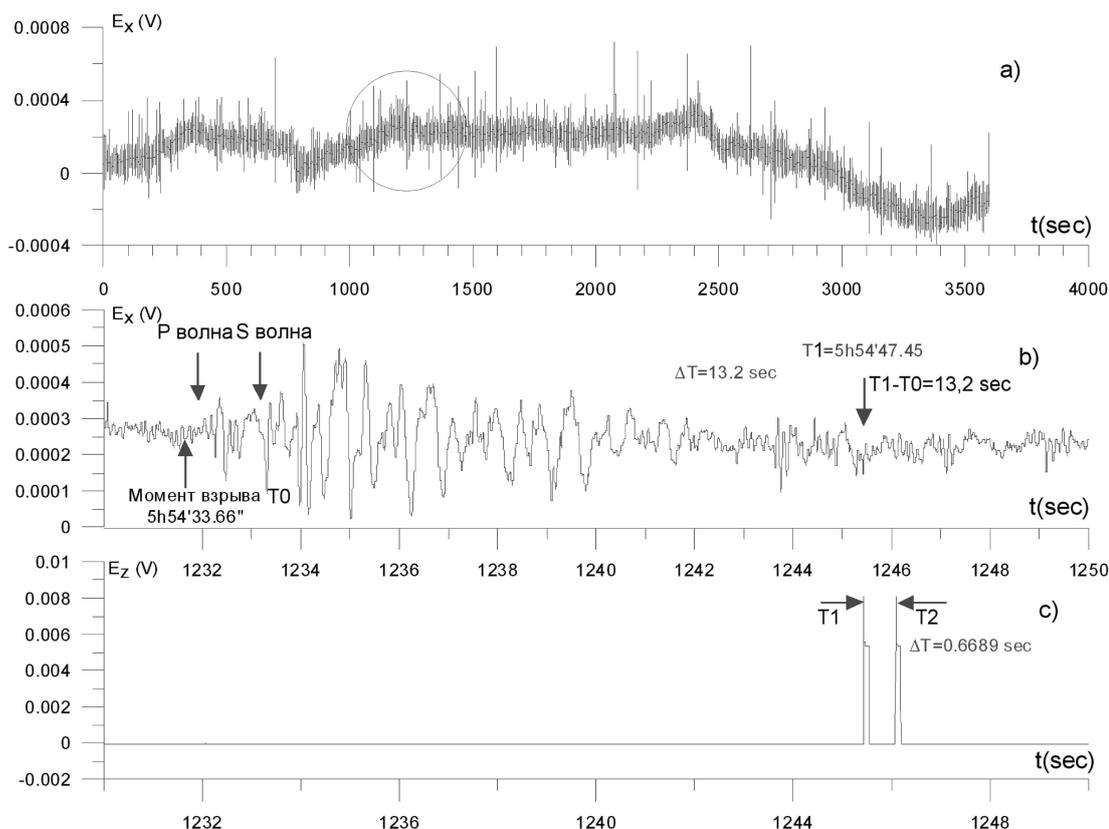


Рис. 4. Результат регистрации северной компоненты электрического поля станцией ИС1 а – полный сеанс записи компоненты E_x – 4000 с; б – детальный участок записи 1230 по 1250 с; в – детальный участок записи огибающей высокочастотного электромагнитного поля (30 КГц – 10МГц) в атмосфере. Поляризация антенны вертикальная.

электрических и магнитных полях, зарегистрированных станцией “Phoenix”.

Обращает на себя внимание задержка во времени реакции компонент электромагнитного поля на произведенный взрыв относительно момента взрыва, равная 1,6637 сек. Примерно с такой же задержкой приходит в пункт наблюдения и продольная сейсмическая волна (Р) от взрыва.

Электромагнитные эффекты, связанные с распространением взрывных волн в земле впервые были отмечены в работах Иванова в 1939, 1940 [6]. На расстояниях до 120 м от места взрыва в почве (масса заряда ВВ около 1,5 кг) зафиксировано появление разности потенциалов между заглублёнными электродами. Данное явление было названо сейсмоэлектрическим эффектом второго рода, в отличие от эффекта первого рода, заключающегося в изменении силы тока между двумя заземлёнными электродами при прохож-

дении упругих волн. Его объяснение, предложенное в работе [7], основано на электрокинетических эффектах в жидкости, заполняющей капилляры и трещины приповерхностного слоя земли. Изменение электрических потенциалов жидкости и стенок капилляров связано с изменением капиллярного давления при деформации грунта в волне. Однако количественная оценка этого эффекта затруднена из-за неопределённости многих параметров: электрокинетического потенциала, удельного сопротивления раствора, вязкости, пористости среды и т.п.

В дальнейшем внимание исследователей было обращено на эффект возмущения геомагнитного поля сейсмическими волнами. Это явление обусловлено возбуждением токов в проводящих слоях земли, движущихся в геомагнитном поле. Было также высказано предположение о возможности возбуждения сейсмическими волнами

магнитоупругих волн на границе земного ядра [8]. Появление связанной магнитоупругой моды обусловлено тем, что вблизи ядра магнитное и упругое давления в волне могут иметь одинаковый порядок величины.

В последнее время наибольшее число работ посвящено сейсмомагнитным явлениям в земной коре, для которых характерна малость магнитного давления по сравнению с упругим. В этом случае акустическая волна играет роль источника возмущений геомагнитного поля, однако последнее при этом не оказывает на волну никакого влияния. Возбуждение упругими волнами в проводящих слоях земли токов и геомагнитных возмущений получило в геофизических работах название индукционного сейсмомагнитного эффекта.

В теории магнитоупругих волн в проводящих средах исследуется самосогласованная система уравнений электродинамики и механики сплошных сред. Эти исследования показали, что специфические магнитоупругие моды возникают только в сильных магнитных полях, когда магнитные и упругие давления имеют величины одинакового порядка. В слабых полях, типа земного магнитного поля, магнитное давление обычно намного меньше упругого. Следовательно, упругие волны можно рассматривать как независимые источники электромагнитных возмущений. Это приближение позволяет более эффективно решать систему уравнений электродинамики и механики сплошных сред.

Таким образом, наблюдаемые в эксперименте вариации электрических и магнитных компонент электромагнитного поля возможно объяснить в рамках сейсмoeлектрической и сейсмомагнитной моделей.

На рис. 4а,б приведен пример записи северной компоненты электрического поля станцией ИС-2 с большей частотой дискретизации (800 Гц), чем приведенные выше результаты (24 Гц). Увеличение частоты дискретизации позволяет более детально увидеть реакцию электрического поля на приход Р и S сейсмических волн. Следует отдельно отметить идентичность спектров наблюдаемых сейсмoeлектрических и сейсмических сигналов.

На рис. 4с представлена запись огибающей вертикальной компоненты электромагнитной волны в атмосфере в диапазоне 30КГц – 10 МГц. В записи обнаруживается пачка из двух сигналов, значительно превышающая по амплитуде фоновый уровень, пришедшая в пункт наблюдения через 13,2 сек после производства

взрыва. Следует отметить, что подобные сигналы с уменьшающейся амплитудой наблюдались в течении 12 часов после производства взрыва. По-видимому, источником наблюдаемых в атмосфере сигналов являются процессы в ионосфере, инициализированные мощным взрывом. К сожалению, сигнал ЭМИ (электромагнитный импульс взрыва) который должен был наблюдаться одновременно с взрывом, обнаружен не был.

Методика геомагнитных наблюдений. Для проведения геомагнитных наблюдений нами были использованы протонные магнитовариационные станции МВ-07 с разрешением 0,01 нТ. На станциях измерялась величина модуля полного вектора T магнитного поля Земли. Дискретность измерений была выбрана максимальной для этого типа станций и составила 1 измерение в 4 секунды. Магнитовариационная станция находилась в 5,6 км от пункта взрыва (координаты: 41° 43,425' с.ш., 73° 20,022' в.д.) Базовая геомагнитная станция располагалась на стационарной станции “Аксу” Бишкекского геодинимического полигона (координаты: 42° 36,618' с.ш., 74° 00,594' в.д.) в 70 км от пункта взрыва.

При проведении прогностических исследований и интерпретации вариаций разностей полных векторов зачастую оперируют понятиями пьезомагнитного или электрокинетического эффектов. Учитывая, что взрыв является мощным и известным источником напряженно-деформационного поля, целью эксперимента было выяснения наличия пьезомагнитного или электрокинетического эффектов от взрыва в слабомагнитных средах.

Регистрация магнитного поля выполнялась до, в момент и после Камбаратинского взрыва. На рис. 5 представлены графики разностного ряда ΔT между пунктом “Камбарата” и базовым пунктом.

Как видно на рис. 5, во временном ряде ΔT не наблюдаются какие-либо эффекты, обусловленные взрывом. Причиной отсутствия сигнала может быть либо низкая чувствительность и недостаточная частота дискретизации магнитовариационных станций, либо отсутствие на слабомагнитных породах пьезомагнитных или электрокинетических эффектов от деформационных возмущений. По этой причине при проведении прогностических наблюдений и интерпретации вариаций магнитного поля над слабомагнитными породами для объяснения аномальных вариаций следует искать другие механизмы их возникновения.

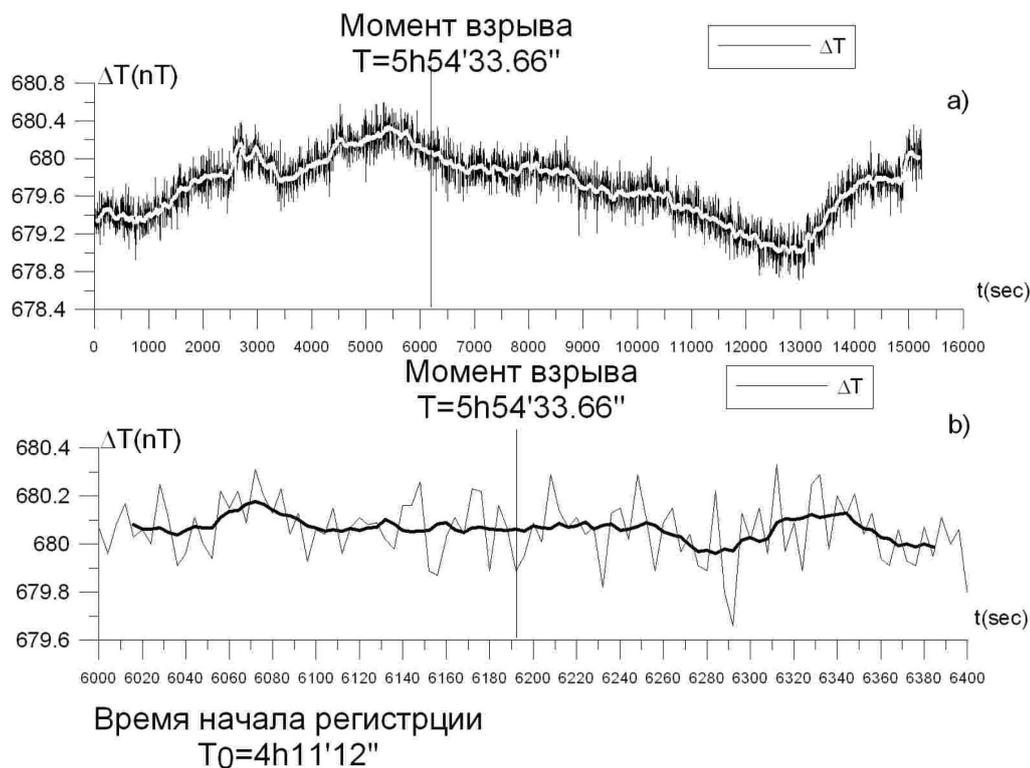


Рис. 5. Графики временного ряда ΔT :
 а – полный ряд наблюдений (16000 с); б – участок временного ряда с 6000 по 6400 с.

Заключение. На примере результатов эксперимента по исследованию эффектов в электромагнитном поле от промышленного взрыва, проведенного в пункте “Камбарата”, установлено следующее:

- электромагнитные эффекты, возникающие при распространении сейсмических волн в земле, обусловлены, по крайней мере, двумя причинами: это сейсмoeлектрические явления в земле и возмущения геомагнитного поля при движении проводящих слоев земли за фронтом волны. Сейсмические и электромагнитные колебания возникают, как правило, практически одновременно, что позволяет отнести последние к косейсмическим явлениям. Обнаружена корреляция электрических и сейсмических спектров;
- механизм возмущений геомагнитного поля, инициируемых сейсмической волной, достаточно подробно исследован теоретически. Источником возмущений являются сторонние токи, которые генерируются вследствие движения проводящей среды во внешнем магнитном поле. При этом в среде возникают токи проводимости, распростра-

нение которых описывается уравнениями диффузионного типа;

- сейсмoeлектрические явления обусловлены электрокинетическим эффектом в пористых водонасыщенных средах. Деформация пористой породы в сейсмической волне создаёт градиент давления в жидкости, заполняющей поры. При этом возникают условия для появления электрокинетического тока. Это косейсмический эффект, проявляющийся практически одновременно с началом сейсмических колебаний;
- при выполнении геомагнитных наблюдений на слабомагнитных породах не наблюдаются какие-либо эффекты, обусловленные взрывом.

Литература

1. Соловьев С.П., Сурков В.В. Электростатическое поле и молнии, возникающие в пылегазовом облаке продуктов взрыва // Геомагнетизм и аэрoномия. 2000. Т. 41. №1. С. 68–76.
2. Jones D.L. Electromagnetic radiation from multiple return strokes of lightning // JATP. 1970. Vol. 32. P. 1077–1093.

3. Андреев Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва. М.: Физматлит, 2002. Т.1.-823 с.
4. Цикулин М.А., Попов Е.Г. Излучательные свойства ударных волн в газах. М.: Наука, 1977.121 с.
5. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев П.П. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Изд. Моск. ун-та, 1990. 264 с.
6. Иванов А.Г. Сейсмоэлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1940. Т.4, №5. С. 699–726.
7. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1944. Т.8, N4. С. 133–150.
8. Knopoff E.L. The interaction between elastic waves motion and magnetic field in electrical conductors //J. Geophys. Res. 1955. Vol. 60. No. 4. P. 617–629.
9. Kaliski S. Solution of the equation of motion in a magnetic field for an isotropic body in an infinite space assuming perfect electric conductivity // Proc. of Vibr. Probl. 1960. Vol. 1. No. 3. P. 53–67.
10. Гульельми А.В. Возбуждение колебаний электромагнитного поля упругими волнами в проводящем теле // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 27. №3. С. 467–470.
11. Гульельми А.В., Рубан В.Ф. К теории индукционного сейсмомагнитного эффекта// Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. №5. С. 47–54.
12. Сурков В.В. Возмущения внешнего магнитного поля продольной акустической волной // Магнитная гидродинамика. 1989. №2. С. 9–12.
13. Makik J., Fitzhugh R., Hormuth F. Electromagnetic signals from underground nuclear explosions Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, New Mexico. LA-10545-MS. 1985.
14. Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
15. Бодулинский В.К., Медведев Ю.А. Электромагнитное возмущение, создаваемое расширяющейся идеально проводящей сферой в магнитном поле // ПМТФ. 1969. №26. С. 102–104.
16. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. 448 с.
17. Kolsky H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives // Nature. 1954. Vol.173, № 4393. P. 77–86.
18. Anderson W.H., Long C.L. Electromagnetic radiation from detonating solid explosives // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. No.4. P. 1494–1495.
19. Воронин А.Н., Медведев Ю.А., Степанов Б.М. Коротковолновое радиоизлучение и ударная волна взрыва ДАН СССР, 1970. Т. 192, №1. С. 67–70.
20. Горишунов Л.М., Кононенко Г.Н., Сиротинин Е.И. Электромагнитные возмущения при взрывах // ЖЭТФ. 1967. Т.53. Вып.3(9). С. 818–821.
21. Соловьев С.П. Электрическое и магнитное поле, возникающее при взрывах зарядов ВВ в воздухе и на поверхности грунта // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках земли. Сб. ст. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 231–253.
22. Адушкин В.В., Соловьев Н. Генерация электрического и магнитного поля при воздушных, наземных и подземных взрывах // ФГВ. 2004. Т. 40. №6. С. 42–51.
23. Соловьев С.П., Шувалов В.В. Динамические процессы при сильных тротильных взрывах // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. Сб. ст. М.: ИДГ РАН, 1999. С. 369–377.
24. Соловьев С.П., Спивак А.А., Сурков В.В. Электромагнитное поле, генерируемое в результате поляризации горных пород при химическом взрыве // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. Сб. ст. М.: ИДГ РАН. 1999. С. 152–158.
25. Soloviev S.P., Surkov V.V., Sweeney J.J. Quadrupolar electromagnetic field from detonation of high explosive charges on the ground surface // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. № B6. 10.1029/2001JB000296.