

УДК 550. 837

АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СВЯЗИ С КУЛТУКСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ НА ОЗ. БАЙКАЛ

© 2012 г. Ю. Ф. Мороз^{1,2}, Т. А. Мороз¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

E-mail: morozyf@kscnet.ru; moroz@irk.ru

Поступила в редакцию 05.05.2011 г.

Рассмотрены результаты наблюдений вариаций горизонтальных и вертикальной составляющих электромагнитного поля Земли в 9 пунктах, расположенных вокруг южной части оз. Байкал. Показано, что за 20 минут до землетрясения произошло затухание вариаций электрического поля с периодом в первые десятки секунд. Эффект является региональным. Он выражен в вариациях горизонтального магнитного поля. Эффект в электрическом поле проявился в различной мере в пунктах наблюдений. Это связано с особенностью распределения электропроводности геологической среды, выявленной по данным МТЗ. В поведении электрического поля выражен также косейсмический эффект, вызванный сейсмической волной. Он проявился в большей мере в вертикальном электрическом поле. В электрическом поле внутриземных источников и в поведении электрического типпера выявлены бухтообразные аномалии, предваряющие и сопровождающие Култукское землетрясение. Аномалии по времени согласуются с подъемом подземных вод в скважине. Обсуждается возможная природа выявленных аномалий.

Ключевые слова: электропроводность, электромагнитное поле, косейсмический эффект, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле Земли содержит информацию о динамических процессах, протекающих в земной коре и верхней мантии. Выявление такой информации представляет важную научную задачу. Имеется ряд научных публикаций [Гульельми, Зотов, 2011; Мороз, Напылова, 1993; Мороз, 1996; Мороз и др., 2007; Рикитаке, 1979; Соболев, Морозов, 1970; Corwin, Morrison, 1977; Djedi et al., 2008; Nagao et al., 2000; Noritomi, 1978; Mogi et al., 1982; Varotsos, Alexopoulos, 1984; Varotsos et al., 1993], в которых обсуждаются аномальные изменения в электромагнитном поле, связываемые с землетрясениями. Существует неоднозначность в выделении аномалий, предваряющих землетрясения. О связи аномальных изменений электромагнитного поля с землетрясениями свидетельствуют косейсмические эффекты. Однако, природа эффектов остается пока неясной.

Проблемы поиска аномальных электромагнитных эффектов, связанных с землетрясениями, обусловлены тем, что наблюдения часто осуществляются на небольших площадях по редкой сети и в кратковременные временные интервалы. Наряду с этим крайне ограничены или практически отсутствуют сведения об электропроводности

геологической среды в пунктах наблюдений, что не дает возможности определить возможную природу эффектов в электромагнитном поле и электропроводности геологической среды.

В последние годы на оз. Байкал ФГУНПП «Иркутскгеофизика» создана система наблюдений электромагнитного поля Земли. Наряду с многолетним мониторингом электрического поля и вариаций геомагнитного поля на каждом пункте наблюдений выполнены магнитотеллурические зондирования, характеризующие структуру электропроводности литосферы. Также ведутся наблюдения за уровнем подземных вод в скважине. Это существенно повышает возможности по выявлению и изучению аномалий, связанных с геодинамическими процессами в Байкальской рифтовой зоне. В период мониторинга электромагнитного поля и электропроводности земной коры в южной части оз. Байкал произошло сильное землетрясение с $M = 6.3$. По данным наблюдений в поведении электрического поля и электропроводности геологической среды выявлены аномалии, которые связываются с данным землетрясением. Анализ выявленных аномалий и обсуждению возможной их природы посвящена настоящая статья.

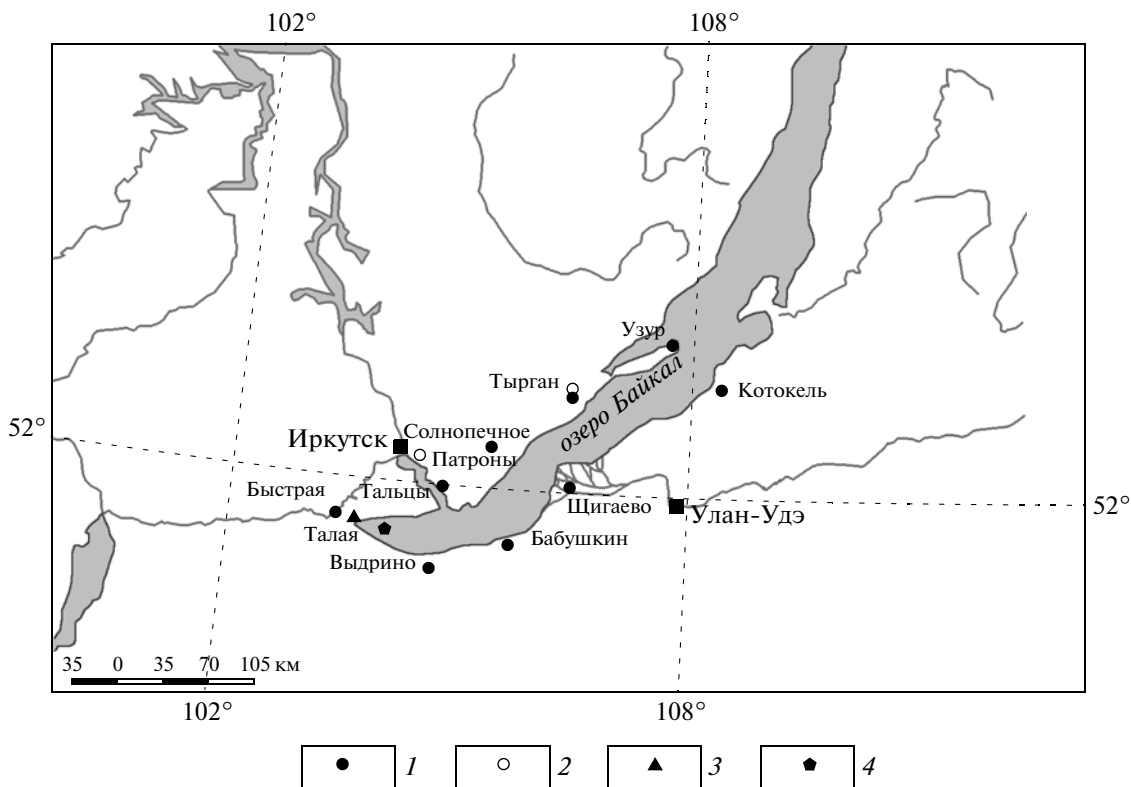


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений электромагнитного поля, уровня подземных вод и эпицентра Култукского землетрясения: 1, 2 и 3 – пункты наблюдений вариаций электрического, магнитного полей и уровня подземных вод; 4 – эпицентр землетрясения.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация электрического поля Земли на оз. Байкал осуществляется в 9 пунктах. Они расположены вокруг южной части озера (рис. 1). К ним относятся пункты Узур (о. Ольхон), Тырган, Солнопечное, Тальцы, Быстрая, Выдрино, Бабушкин, Шигаево, Котокель. Место расположения пунктов выбрано с условиями, чтобы не было технических помех и геоэлектрическая среда являлась резко неоднородной. По данным предварительных электротеллурических и магнитотеллурических наблюдений определены направления осей геоэлектрической неоднородности среды на каждом пункте. По этим направлениям расположены измерительные линии. Установка линий крестообразная (рис. 2).

На пунктах Узур, Тырган, Солнопечное, Быстрая запись электротеллурического поля осуществляется с использованием японских регистраторов DATAMARK. На этих пунктах регистрирующие линии имеют общий (нулевой) электрод (рис. 2а). В каждом, из четырех направлений, относительно нулевого электрода проложены основные и дублирующие линии длиной 125 и 250 м. В остальных пунктах использовались отечественные приборы JAE. Здесь установки были без общего (нулевого) электрода (рис. 2б). Длина основных линий 500 м, дублирующих –

250 м. Азимуты приемных линий в пп. Узур – 12° и 162°, Тырган – 15° и 105°, Солнопечное – 78° и 168°, Тальцы – 82° и 172°, Быстрая – 55° и 145°, Выдрино – 47° и 137°, Бабушкин – 64° и 144°, Шигаево – 60° и 150°, Котокель – 43° и 133°. В ка-

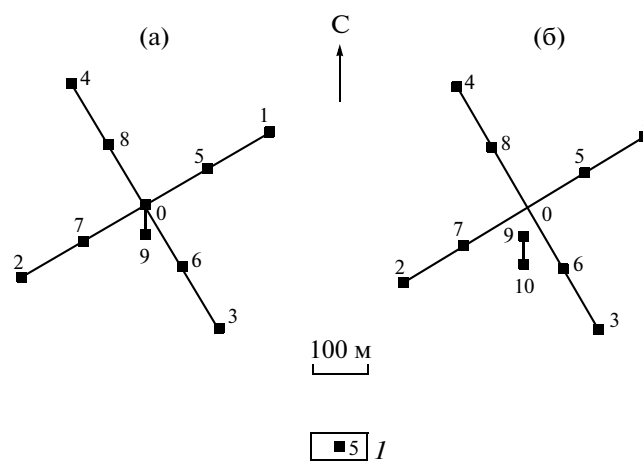


Рис. 2. Системы наблюдений электрического поля японскими (а) и российскими (б) регистраторами: (а) – установка приемных линий с общим нулевым электродом, (б) – установка с отдельными электродами; 1 – электрод и его номер. Линейный масштаб приведен для измерительных линий.

честве заземлений использованы свинцовые электроды, опущенные на глубину 4 м. Наряду с горизонтальными компонентами электрического поля на каждом пункте осуществляется регистрация вертикальной компоненты в скважине без обсадки. Глубина скважин 40–50 м. Скважины затопонированы глиной. В качестве электродов также использовались свинцовые пластины, погруженные на глубину 4 м и 40–50 м. Регистрация электротеллурического поля производилась с дискретностью 10 с. Наряду с этим регистрировались вариации геомагнитного поля компонент H , D , Z в п. Тырган с дискретностью 1 с. Также использованы данные геомагнитной обсерватории “Патроны” Института солнечно-земной физики СО РАН (рис. 1).

Мониторинг уровня подземных вод ведется в пункте Талая, расположенном в юго-западной оконечности оз. Байкал (рис. 1). Наблюдения осуществляются в скважине глубиной 120 м (в интервале 77–79,5 м) с помощью измерительного прибора “Кедр”, обеспечивающего автоматическую регистрацию уровня воды с дискретностью 1 час. Наблюдательный пункт обслуживает ФГУНПП “Иркутскгеофизика”.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Байкальский рифт выражен на дневной поверхности впадиной озера Байкал. Она вытянута в северо-восточном направлении на расстояние 636 км при средней ширине около 50 км. Впадина озера заполнена пресной водой с удельным электрическим сопротивлением 200–300 Ом м. Толщина водного слоя в южной части озера достигает 1,7 км. На дне озера залегают низкоомные отложения со средним продольным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом м. Осадочная толща подстилается породами с удельным электрическим сопротивлением в первые сотни – тысячи Ом м. Фундамент впадины может быть разбит разломами на крупные блоки. Бортовые части впадины сложены осадочными дислоцированными и метаморфическими породами с удельным электрическим сопротивлением от первых десятков до первых тысяч Ом м. Литосфера под Байкалом содержит проводящие слои, связанные с повышенным содержанием жидких флюидов [Бердичевский и др., 1999; Мац и др., 2001; Попов, 1977].

По гравиметрическим и другим геолого-геофизическим данным мощность осадочной толщи меняется от первых сотен метров до 4000 м и более [Мац и др., 2001]. Северо-западный борт впадины более крутой, чем юго-восточный. Южная часть впадины ограничена на северо-востоке Обручевским разломом, на юго-западе – разломом Черского. К северо-западу от южной оконечно-

сти озера располагается Саянский глубинный разлом. Зоны разломов имеют протяженность в первые сотни–тысячи километров. Ширина их оценивается в первые десятки–сотни метров и более [Мац и др., 2001].

Байкальский рифт характеризуется повышенной сейсмической активностью. Основное количество землетрясений приурочено к акватории озера. Гипоцентры их сосредоточены в верхнем слое земной коры мощностью 12–15 км. Глубже 35 км отмечаются лишь отдельные землетрясения. Ежегодно в районе Байкала регистрируется более 300 землетрясений [Геология..., 1984]. В юго-западной оконечности озера Байкал 27.08.2008 г. произошло сильное Култукское землетрясение с $M = 6.3$ (рис. 1). Гипоцентр землетрясения расположен на глубине около 14 км. Афтершоки распространялись от эпицентра главного толчка в северо-западном направлении вдоль юго-западного побережья озера. Ощутимые сотрясения при этом землетрясении охватили обширную территорию. Наибольшие сейсмические эффекты наблюдались в северо-западных румбах. В электромагнитном поле Земли проявились аномальные изменения, предваряющие и сопровождающие Култукское землетрясение.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассмотрим данные мониторинга электрического поля за несколько минут до землетрясения и после землетрясения, произошедшего 27.08.2008 г. в 01 час, 35 минут и 31 с по международному времени. Временные ряды разности потенциалов электрического поля получены на линиях длиной 125, 250, 500 и 40 м. Для сравнительного анализа разность потенциалов пересчитана в напряженность электрического поля на длину приемной линии в один километр. На рис. 3, рис. 4 приведены графики напряженности электрического поля с дискретностью 10 с на всех пунктах, за исключением п. Быстрая, где аппаратура кратковременно не работала по техническим причинам. В каждом направлении представлены графики основного канала и дублирующего. На временной оси нижнего графика показан момент землетрясения, указаны магнитуда и расстояние пункта наблюдения до эпицентра землетрясения.

Рассмотрим основные особенности структуры вариаций электротеллурического поля. На графиках проявились вариации поля с периодами от первых десятков секунд до первых минут. Низкочастотные вариации выражены в виде бухт. Интенсивность высокочастотных вариаций до землетрясения была слабее, чем после землетрясения. Характерно, что примерно за 20 минут до землетрясения в спектре электротеллурического поля не проявились короткопериодные вариации

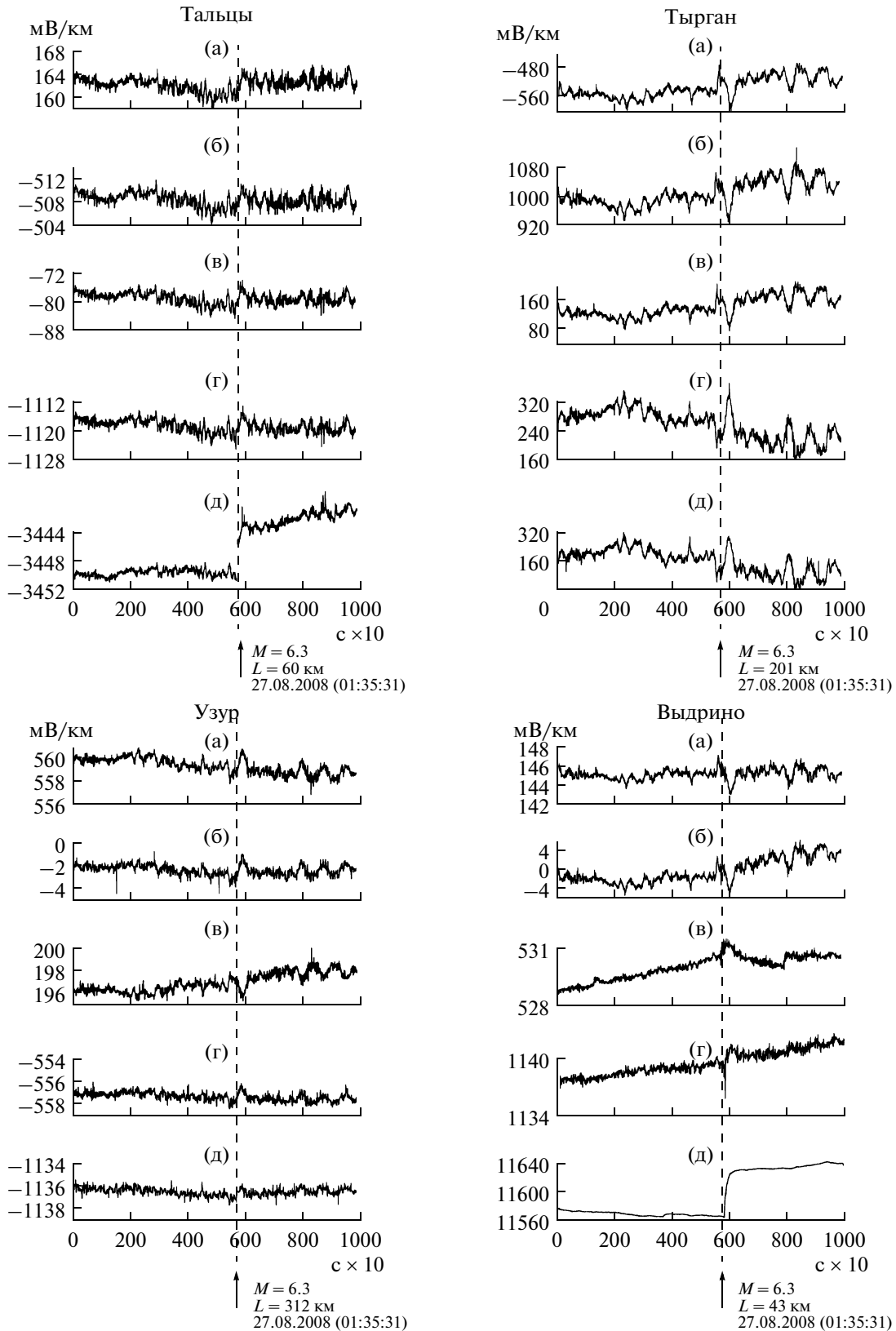


Рис. 3. Временные ряды напряженности электрического поля в пп. Тальцы, Тырган, Узур и Выдрино. Каналы: (а) и (б) – основной и дублирующий; (в) и (г) – основной и дублирующий; (д) – вертикальный; п. Тальцы: азимуты каналов (а), (б) и (в), (г) – 82° и 172°; п. Тырган – 15° и 105°; п. Узур – 72° и 162°; п. Выдрино – 47° и 137°. На оси времени указан момент землетрясения. Здесь приведены: магнитуда землетрясения (M), эпицентрального расстояния (L) и время землетрясения.

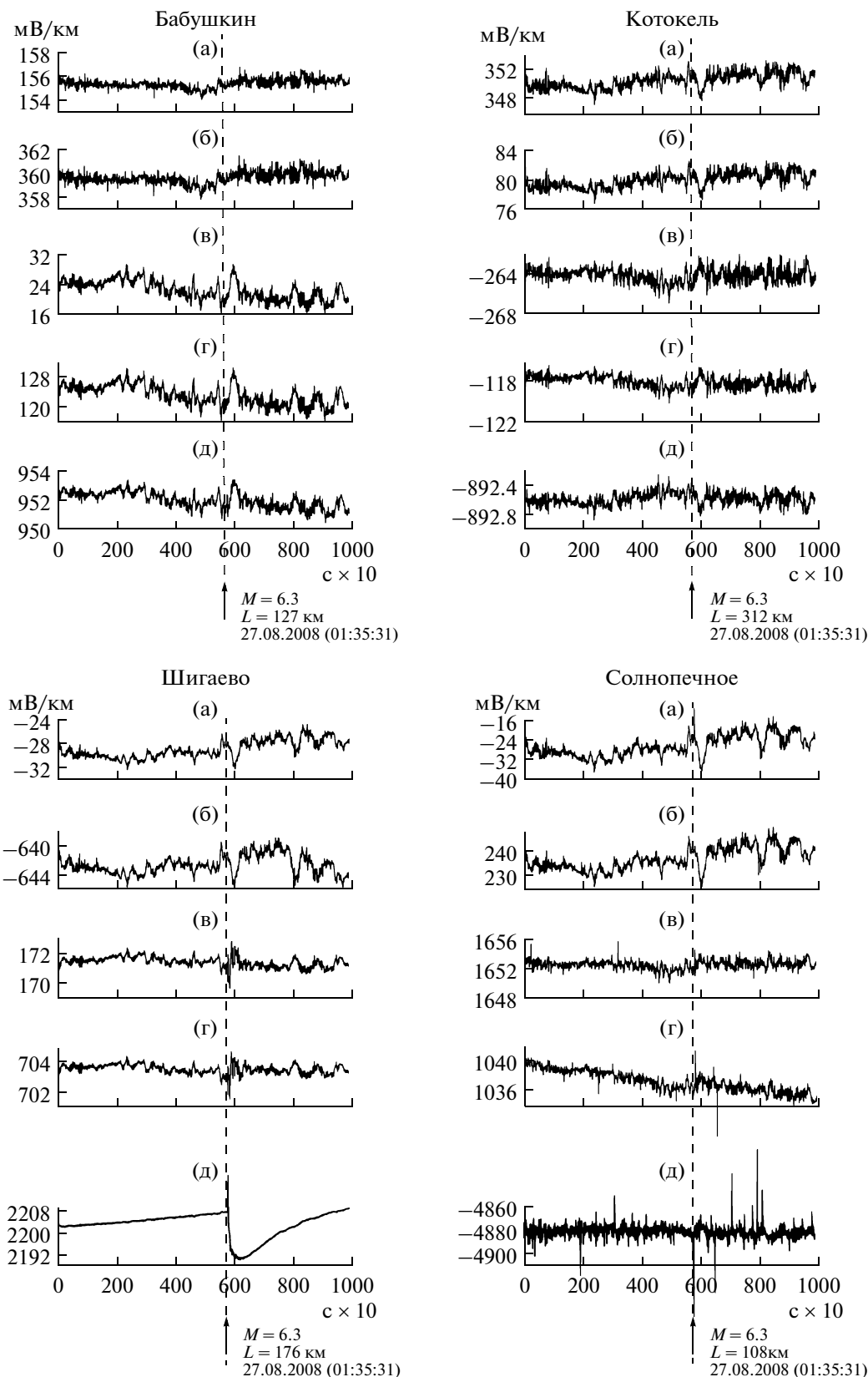


Рис. 4. Временные ряды напряженности электрического поля в пп.Бабушкин, Котокель, Шигаево и Солнопечное. Каналы: (а) и (б) – основной и дублирующий; (в) и (г) – основной и дублирующий; (д) – вертикальный. п. Бабушкин: азимуты каналов (а), (б) и (в), (г); $64^\circ - 144^\circ$, Котокель – 43° и 133° ; Шигаево – 60° и 150° ; Солнопечное – $78^\circ - 168^\circ$. На оси времен указан момент землетрясения. Здесь приведены: магнитуда землетрясения (M), эпицентрального расстояние (L) и время землетрясения.

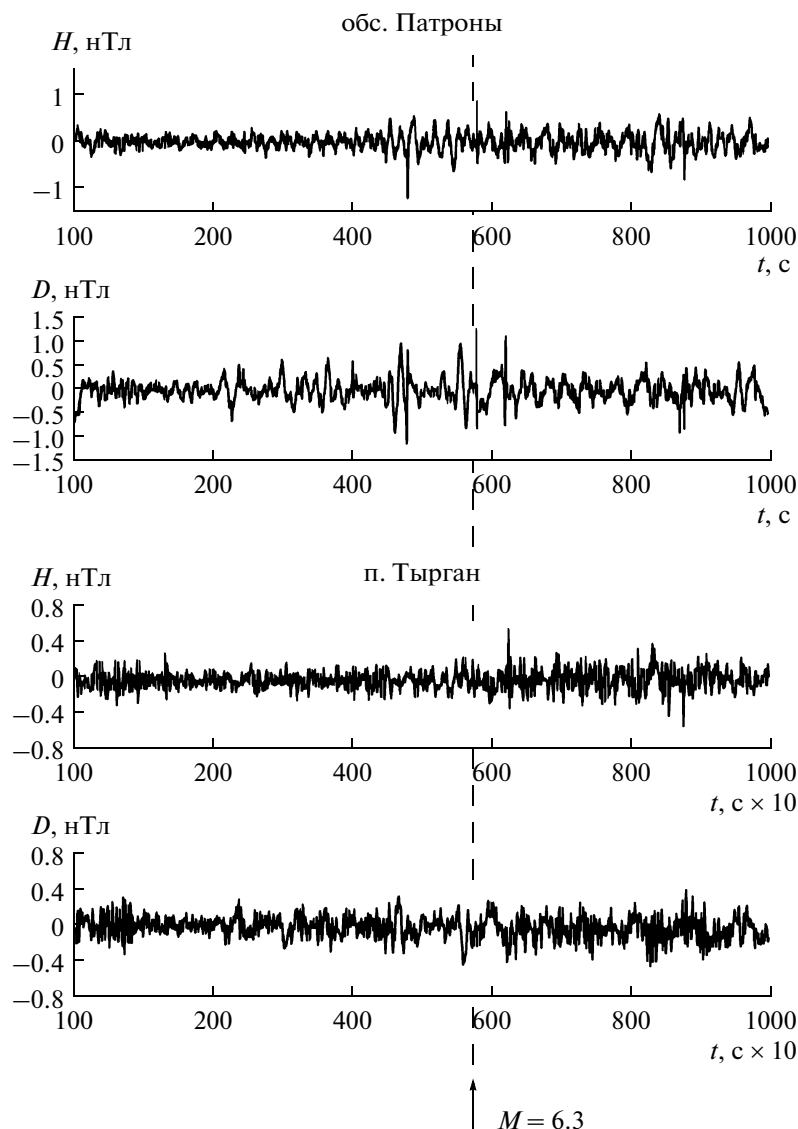


Рис. 5. Графики напряженности составляющих геомагнитного поля H и D в обс. Патроны и п. Тырган. На временной оси указан момент землетрясения с $M = 6.3$.

с периодом в первые десятки секунд. Это наиболее заметно выражено в пп. Тальцы, Солнопечное, Бабушкин и Котокель. В п. Тырган, Узур, Шигаево, Выдрино эффект практически не выражен или выражен слабо.

Каким образом эффект выглядит в геомагнитном поле? Обратимся к данным мониторинга вариаций геомагнитного поля в п. Тырган и в обс. Патроны. Короткопериодные вариации не выражены на фоне более интенсивных длиннопериодных изменений геомагнитного поля. Поэтому, временные ряды напряженности поля профильтрованы таким образом, чтобы выделить вариации подобные в электротеллурическом поле. На рис. 5 в более крупном масштабе для лучшей наглядности приведены временные ряды напряженности составляющих геомагнитного поля H и

D после фильтрации. На графиках выражено затухание короткопериодных вариаций перед землетрясением.

Наряду с эффектом затухания в электрическом поле проявились скачкообразные изменения по времени близкие к моменту землетрясения. В большей мере они выражены в поведении вертикальной компоненты электрического поля. Эти резкие изменения поля выражены в пунктах Тальцы, Выдрино, Шигаево, Солнопечное (рис. 3, рис. 4). Амплитуда “скачков” меняется от первых единиц до первых десятков мВ/км. В п. Выдрино, более близком к эпицентру землетрясения, амплитуда “скачка” является максимальной. Однако в п. Тальцы амплитуда сигнала меньше, чем в пунктах Шигаево и Солнопечное, более удаленных от эпицентра землетрясения.

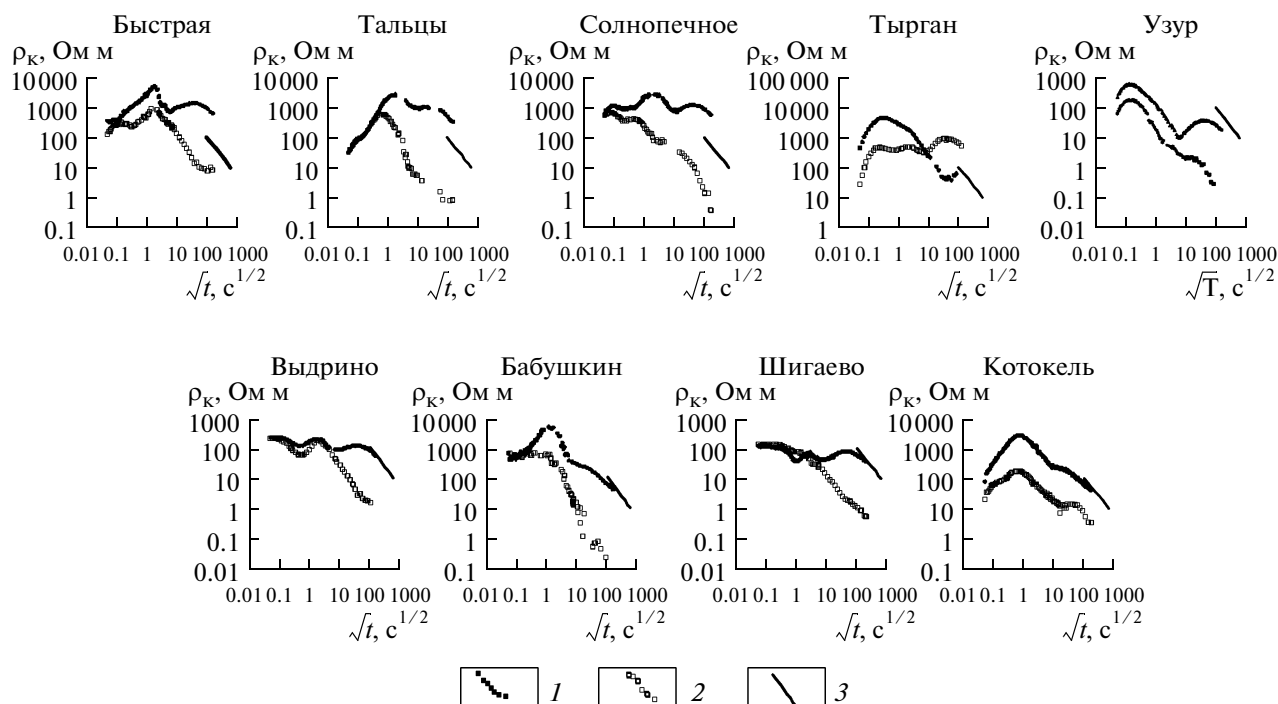


Рис. 6. Кривые МТЗ: 1, 2 и 3 – максимальные, минимальные и нормальные кривые кажущихся сопротивлений.

Следовательно величина сигнала не зависит от расстояния до эпицентра землетрясения. Характерно, что в п. Шигаево после “скачка” напряженности электрического поля происходит плавное становление поля до нового уровня. В пп. Тальцы, Выдрино прежний уровень поля на рассматриваемом временном интервале не восстановился. В п. Солнопечное аномальный эффект выражен только в виде “скачка” напряженности электрического поля. Здесь не проявились процессы становления поля. В горизонтальных составляющих электротеллурического поля эффекты заметно проявились в пунктах Выдрино и Шигаево. Они в большей мере выражены на линиях, ориентированных вкост простирания Байкальской впадины.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АНОМАЛИЙ

Как, мы уже отметили, перед землетрясением происходит затухание высокочастотных вариаций электротеллурического поля с периодами в первые десятки секунд. Затухание началось примерно за 20 минут до землетрясения. Какова природа аномального затухания короткопериодных вариаций перед землетрясением? Известно, что интенсивность и поляризация вариаций поля зависит от внешнего ионосферного источника и электропроводности геологической среды. Эффект выражен в вариациях геомагнитного поля. Он является региональным и связан с внешним

источником. Возникает вопрос, является ли эффект затухания короткопериодных вариаций предвестником землетрясения? Например, в работе [Гульельми, Зотов, 2011], установлено понижение интенсивности вариаций Pс1 при повышенной сейсмичности. Предполагается, что при сейсмической активизации в атмосфере подавляются электромагнитные волны внешнего источника. Не исключено, что подобная ситуация была возможна при Култукском землетрясении. Однако, это лишь предположение. Следует отметить, что эффект практически не выражен на ближайшем пункте Выдрино. Зато он заметно проявился на удаленном пункте Котокель. Создается впечатление, что степень проявления эффекта определяется особенностью строения геологической среды на каждом пункте наблюдения.

Для выяснения этого вопроса воспользуемся результатами магнитотеллурических зондирований. Они выполнены на каждом пункте в диапазоне периодов от десятых долей секунды до 10000 с и более. Кривые МТЗ получены по направлениям осей геоэлектрической неоднородности среды. Кривые МТЗ приведены в сопоставлении с нормальной кривой кажущегося электрического сопротивления (рис. 6). Они дают представление об электропроводности среды до глубин в первые сотни километров. Мы не будем детально останавливаться на результатах интерпретации МТЗ на каждом пункте наблюдений, так как это будет рассмотрено в специальной публикации. Характерно, что максимальные и мини-

мальные кривые кажущегося электрического сопротивления на всех пунктах расходятся по уровню сопротивлений с увеличением периода вариаций. При этом форма максимальной и минимальной кривых является противоположной. Такое поведение кривых характерно для глубинных разломов [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Чем ближе разлом к дневной поверхности, тем на более ранних периодах начинается расхождение кривых. Так, в пп. Тальцы, Солнопечное, Бабушкин и Котокель расхождение кривых ρ_{\max} и ρ_{\min} начинается на периодах в десятки доли секунд, т.е. влияние проводящих разломов проявляется в верхних частях земной коры. Это влияние характеризуется пониженной интенсивностью вариаций с периодами в первые десятки секунд по отношению к длиннопериодным. Поэтому, затухание короткопериодных вариаций перед землетрясением выражено в электрическом поле более контрастно. Особенно это заметно в п. Тальцы и Котокель, где верхний осадочно-вулканогенный чехол отличается повышенной проводимостью, так как левые восходящие ветви кривых МТЗ в указанных пунктах начинаются с более низких значений кажущихся электрических сопротивлений. Обратимся к пп. Выдрино, Тырган, Шигаево, Узур. Здесь расхождение кривых ρ_{\max} и ρ_{\min} начинается с периода 100 с. Следовательно, разломы в земной коре начинаются глубже. Влияние проводящих разломов проявляется пониженной интенсивностью длиннопериодных вариаций по отношению к короткопериодным. Поэтому на фоне пониженной интенсивности длиннопериодных вариаций эффект затухания короткопериодных вариаций перед землетрясением выражен слабее, чем на пунктах, рассмотренных ранее. Таким образом, мы убедились, что затухание вариаций с периодами в первые десятки секунд связано с различным распределением электропроводности геологической среды в пунктах наблюдений.

Рассмотрим возможную природу резких импульсов электротеллурического поля во время землетрясения. Анализ показал, что время возникновения импульсов отличается от времени момента землетрясения. На рис. 7 представлен график зависимости разницы времени (dt) от расстояния до эпицентра землетрясения (L). Согласно данному графика скорость распространения сигнала от землетрясения оценивается в 3.2 км/с. Эта оценка является весьма грубой, так как регистрация электрического поля осуществляется с дискретностью 10 с. Даже при такой грубой оценке полученная скорость является близкой к скорости упругой волны в верхнем слое по сейсмологическим данным [Крылов и др., 1981]. Следовательно, возникновение электрических импульсов связано с приходом сейсмической волны. Поэто-

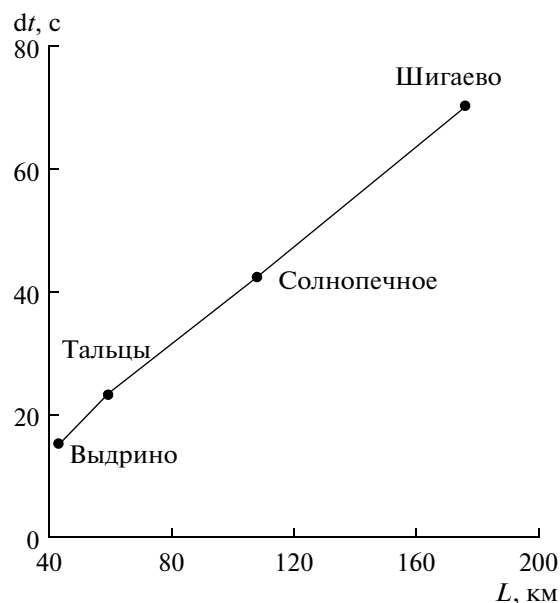


Рис. 7. График зависимости разности времени между моментом землетрясения и временем возникновения импульсов от эпицентрального расстояния.

му скачкообразные импульсы можно назвать косейсмическими сигналами. Они могут возникнуть в результате перемещения электродов при сотрясении почвы во время прихода сейсмической волны. В таком случае электроды действуют как сейсмографы, регистрируя сотрясение почвы. Тогда возникает вопрос, почему на пункте наблюдения 9–10 электродов, а как сейсмографы действуют только отдельные из них? По-видимому, возникают какие-то другие преобразователи сейсмической энергии в электрическую.

Обратимся к кривым МТЗ на пунктах, где проявились сейсмoeлектрические сигналы. На кривых МТЗ в диапазоне периодов 0.1–4 с выражен минимум, который отражает наличие проводящего слоя. По грубым оценкам глубина кровли данного слоя в п. Шигаево около 300 м, в пп. Тальцы, Солнопечное, Выдрино примерно около 1 км. Повышенная проводимость слоя может быть связана с осадочными породами, насыщенными минерализованными водами. Не исключено, что он имеет гидрогеодинамическую связь с приповерхностным обводненным слоем через трещины и разломы. В пользу этого свидетельствует невысокое поперечное сопротивление высокоомной толщи, перекрывающей проводящий слой. При наличии воды в горных породах возможен электрокинетический эффект [Mizutani, 1976]. В нашем случае, он может быть связан с распространением сейсмических волн, ускоряющих движение воды, насыщающих породы. Это является причиной косейсмических изменений электрического поля. Эффект в большей мере проявился в вертикальной компоненте электри-

ческого поля, так как нижний электрод в скважине, по-видимому, приближен к обводненному слою или находится в нем. Амплитуда сейсмoeлектрического сигнала определяется интенсивностью сейсмической волны. На ближних пунктах амплитуда сигнала больше. На удаленных пунктах амплитуда сигнала уменьшается в связи с ослаблением сейсмической волны.

Сейсмoeлектрический эффект в горизонтальных составляющих электрического поля проявляется неоднозначно. Это может быть связано с различной степенью обводненности среды, в которой находятся электроды. Также, необходимо иметь в виду, что регистрация разности потенциалов электрического поля осуществлялась с дискретностью 10 с. При такой частоте регистрации изменения электрического поля в первые секунды могут быть пропущены.

Обратимся к формам сигналов. Мы уже отмечали, что в пп. Шигаево и Выдрино после “всплеска” напряженности вертикального электрического поля отмечается процесс его становления. Наряду с этим уровень напряженности каналов пп. Выдрино и Тальцы после землетрясения не восстановился. Это можно объяснить изменением условий заземления электродов, что, по-видимому, отразилось в становлении напряженности электрического поля и изменении его уровня. Таким образом, форму сигнала в виде скачкообразного изменения напряженности электрического поля и его становления можно объяснить электрокинетическим эффектом и смещением электродов в результате действия сейсмической волны от землетрясения.

Кроме рассмотренных высокочастотных аномальных изменений в естественном электрическом поле выявлены низкочастотные аномалии, а также аномалии в изменении геоэлектрической неоднородности среды, которые связываются с Култукским землетрясением. Эти аномалии в большей мере выражены в п. Быстрая, наиболее приближенным к эпицентру землетрясения. Данный пункт располагается в зоне Саянского глубинного разлома. Расстояние между эпицентром землетрясения и п. Быстрая составляет 42 км. Рассмотрим методику выделения аномалий и возможную их природу.

АНОМАЛИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Электрическое поле Земли содержит вариации поля, генерируемые внешними и внутриземными источниками. Электрическое поле внутриземных источников может быть вызвано электрохимическими, электрокинетическими, пьезоэлектрическими и другими процессами, протекающими в литосфере сейсмоактивных регионов. Рассмотр-

им возможность выделения вариаций поля внутриземных электрических источников из электрического поля Земли в п. Быстрая. Обратимся к низкочастотному электрическому полю Земли, в котором интенсивность вариаций внешнего (ионосферного, магнитосферного) в значительной мере ослаблена. Для этого исходный временной ряд электрического поля основного канала с дискретностью 10 с (Аз — 50 град.) преобразован в ряд среднечасовых значений напряженности. Из полученного временного ряда удалены высокочастотные вариации путем фильтрации с окном 50 часов. Наряду с этим отфильтрованы также низкочастотные вариации с окном 1000 часов.

Полученный таким путем временной ряд напряженности электрического поля изображен на рис. 8. На временной оси показан момент Култукского землетрясения. В поведении временного ряда в 2008 году выражена бухтообразная аномалия интенсивностью до 100 мВ/км. Аномальное изменение началось примерно за 40 суток до момента землетрясения. В период аномального возмущения была остановка работы аппаратуры по техническим причинам. Этот период на графике выражен прямолинейным горизонтальным отрезком. Анализ показал, что аномалия не связана с дождевыми осадками. Возникает вопрос, может ли данная аномалия связана с внешним источником?

Для грубой оценки интенсивности электротеллурического поля воспользуемся соотношением $E_{гор} = ZH_{гор}$, справедливым для горизонтально-однородной среды, где E и H напряженности горизонтального электрического и магнитного полей, Z — импеданс (входное комплексное сопротивление среды). Рассмотрим крайний случай — магнитные бури. В 2008 году интенсивность магнитных бурь не превышает 300 нТл. Импеданс на периодах более 9 суток менее 0.05 мВ/(км нТл) [Рокитянский, 1975]. Следовательно, напряженность электротеллурического поля во время магнитных бурь будет не более 15 мВ/км. В нашем случае вариация имеет продолжительность более 9 суток и ее напряженность около 100 мВ/км. Во время вариации не было сильной магнитной бури. Следовательно, данная аномалия не может быть связана с внешним источником.

Обратимся к данным мониторинга уровня подземных вод в скважине в п. Талая, расположенном на берегу оз. Байкал, в 14 км от п. Быстрая. График равномерных наблюдений приведен на рис. 8. Значения уровня воды приведены в относительных единицах. График уровня воды сопоставлен с графиком напряженности электрического поля. На рис. 8 видно, что аномалия уровня воды в скважине по времени совпадает с аномальным изменением напряженности электрического поля. Это дает основание полагать, что поведение

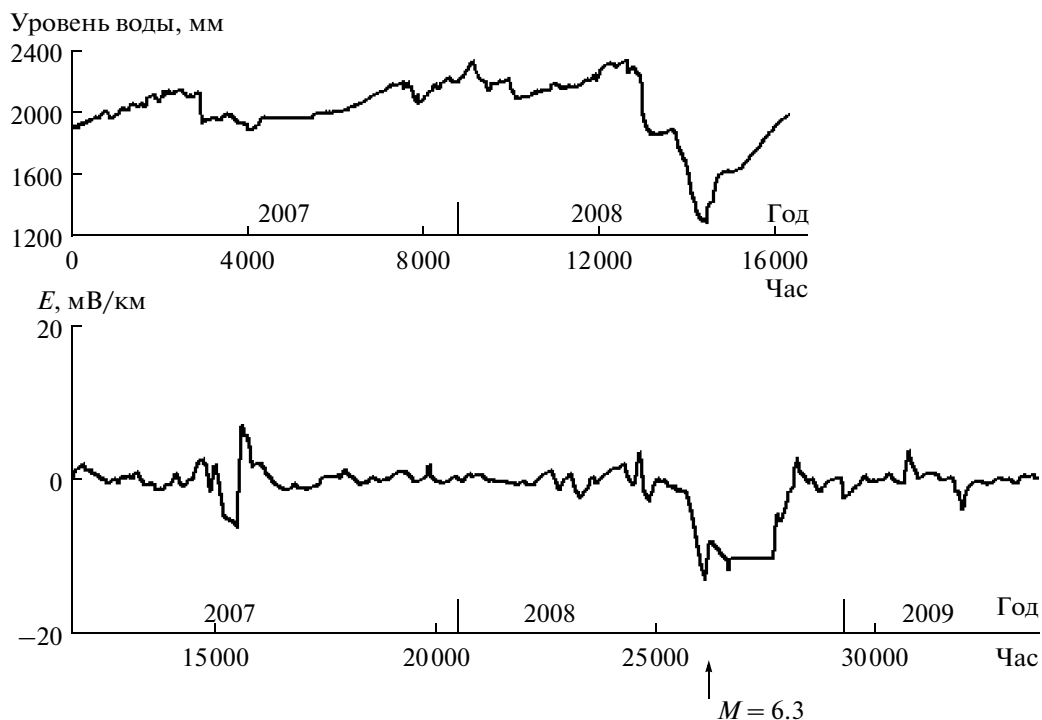


Рис. 8. Сопоставление графиков напряженности электрического поля внутриземных источников в п. Быстрая и уровня подземных вод в п. Талая. На временной оси указан момент землетрясения с $M = 6.3$.

напряженности электрического поля связано с изменением уровня подземных вод. Данную связь можно объяснить следующим образом. Перед землетрясением увеличились тектонические напряжения, которые вызвали поднятие уровня подземных вод. В результате возникли электрокинетические, электрохимические и другие эффекты в верхних частях земной коры, которые проявились аномальным изменением напряженности электрического поля.

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СРЕДЫ

Вариации электротеллурического поля содержат информацию об электропроводности геологической среды. В горизонтально-однородных средах вертикальная составляющая поля равна нулю [Бердичевский, Дмитриев, 2009;] В средах содержащих геоэлектрические неоднородности вертикальная составляющая поля отлична от нуля. Это дает возможность по данным мониторинга вертикальной и горизонтальных составляющих поля получить информацию о динамике геоэлектрической неоднородности среды [Мороз и др., 2008]. Для ее изучения использована связь между вертикальной и горизонтальными составляющими электротеллурического поля в частотной области, представленная в следующем виде:

$$E_z = [P] E_{гор},$$

$$[P] = [P_{zx} P_{zy}], E_z = P_{zx} E_x + P_{zy} E_y,$$

где E_z, E_y, E_x – составляющие электротеллурического поля, P_{zx}, P_{zy} – компоненты матрицы, зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

Матрица $[P]$ называется электрическим типпером. Она представляет собой матрицу опрокидывания, преобразуя горизонтальные составляющие поля в вертикальную. Электрический типпер может быть представлен в виде вещественной и мнимой стрелок:

$$ReP = ReP_{zx} \mathbf{1}_x + ReP_{zy} \mathbf{1}_y,$$

$$ImP = ImP_{zx} \mathbf{1}_x + ImP_{zy} \mathbf{1}_y,$$

Вектор ReP характеризует влияние активных избыточных токов, находящихся в фазе с горизонтальным электрическим полем. Вектор ImP отражает влияние реактивных избыточных токов, фаза которых отличается от фазы горизонтального электрического поля на $\pi/2$. В двумерной модели вещественные и мнимые стрелки коллинеарны.

В п. Быстрая по данным непрерывной месячной регистрации электрического поля с дискретностью 10 с по программе [Larsen et al., 1997] рассчитаны частотные характеристики электрического типпера в диапазоне периодов от первых десятков до 10000 с. Анализ показал, что модули вещественных и мнимых стрелок практически не меняются с изменением периода вариаций. Мо-

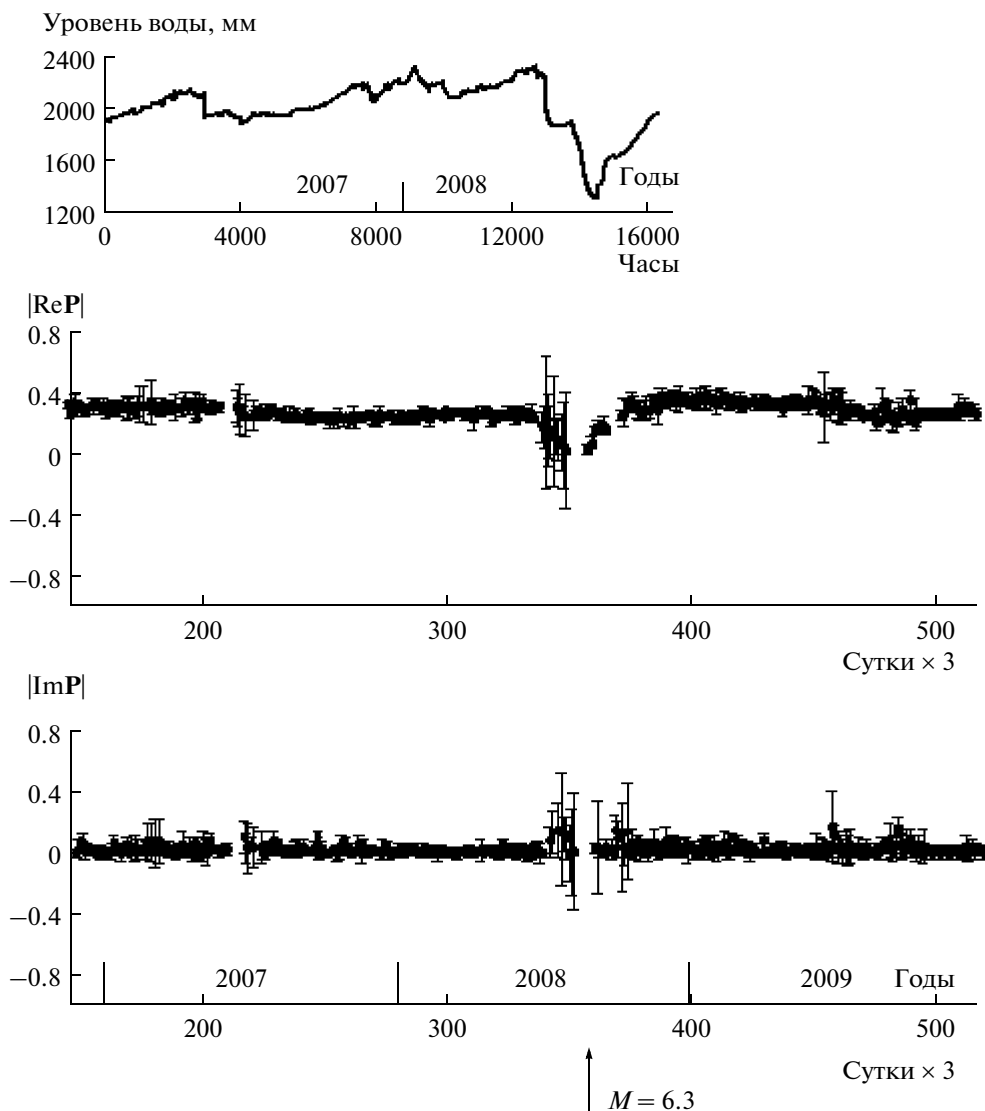


Рис. 9. Сопоставление графиков вещественной $|\text{ReP}|$ и мнимой $|\text{ImP}|$ частей электрического типпера в п. Быстрая с графиком уровня подземных вод в п. Талая. На временной оси указан момент землетрясения с $M = 6.3$.

дуль вещественной стрелки является близким к 0.4, а модуль мнимой стрелки не превышает 0.05. Азимут вещественной стрелки меняется незначительно. Азимут мнимой стрелки определяется крайне неустойчиво из-за малых значений их модулей. Это свидетельствует об основном вкладе активных токов в вертикальную компоненту электрического поля. Вклад реактивных токов в вертикальную компоненту крайне мал.

Полученные данные указывают, что преобладает гальванический механизм перераспределения токов в зоне крупной геоэлектрической неоднородности, какой является Саянский глубинный разлом. О геоэлектрической неоднородности можно судить по форме электрической полярной диаграммы. Она на периоде 360 с имеет вид восьмерки с лепестками вытянутыми в направлении перпендикулярном к оси однородности среды. Такой

вид диаграммы характерен для двумерной модели, представляющей в нашем случае глубинный разлом.

Для мониторинга электрического типпера использована программа [Larsen et al., 1997]. Предварительно выбраны оптимальные условия, при которых компоненты типпера определяются устойчиво в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Анализ показал, что при регистрации вариаций с дискретностью 10 с временной интервал должен быть не менее 3 суток при когерентности между вертикальной и горизонтальными составляющими электрического поля не менее 0.8.

В результате обработки данных получены временные ряды параметров типпера на периодах от 70 до 12000 с. На рис. 9 приведены графики моду-

лей вещественных и мнимых стрелок на периоде 360 с за время наблюдений с конца 2006 г. по конец 2009 г. На временной оси графика указан момент Култукского землетрясения. Во временных рядах $|\text{ReP}|$ и $|\text{ImP}|$ имеется разрыв во времени близкий к моменту землетрясения из-за технической неисправности аппаратуры. В графике $|\text{ReP}|$ видна бухтообразная аномалия, которая предвещает и сопровождает землетрясение. Аномальные изменения произошли за 10–15 суток до землетрясения. Интенсивность аномалии $|\text{ReP}|$ около 0.4. Следует отметить, что в графике $|\text{ImP}|$ подобная аномалия не проявилась. Это свидетельствует о том, что аномальное изменение типпера связано с основным вкладом активных токов в вертикальную составляющую электрического поля. Вклад реактивных электрических токов практически равен нулю.

Графики электрического типпера сопоставлены с уровнем подземных вод в п. Талая (рис. 9). Аномалия вещественной части электрического типпера согласуется с подъемом уровня подземных вод. На основании этого можно предположить следующее. При геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения, повысился уровень подземных вод и возросла степень обводненности пород верхних частей земной коры в районе пункта наблюдения. Приближение уровня подземных вод к дневной поверхности привело к уменьшению степени геоэлектрической неоднородности среды и вкладу активных электрических токов в вертикальную компоненту электрического поля. В результате уменьшился модуль вещественной электрической стрелки практически до 0, что проявилось в виде бухтообразной аномалии $|\text{ReP}|$.

ВЫВОДЫ

В электротеллурическом поле, примерно, за 20 минут до землетрясения не проявились или слабо проявились короткопериодные вариации с периодами в первые десятки секунд. Эффект выражен в геомагнитном поле. Он является региональным. Связь эффекта с землетрясением проблематична. Различная степень проявления эффекта в пунктах наблюдений определяется электропроводностью геологической среды. Эффект в лучшей мере выражен в районах, где проводящие глубинные разломы затрагивают верхние части земной коры и повышена проводимость осадочно-вулканогенного чехла. Эффект выражен слабее или практически не выражен в районах с более глубинными проводящими разломами.

Наряду с затуханием высокочастотных вариаций перед землетрясением в электрическом поле проявились скачкообразные изменения по времени близкие к моменту землетрясения. В боль-

шей мере они выражены в поведении вертикальной компоненты электрического поля. Эффект связан с приходом сейсмической волны и является косейсмическим. Амплитуда сейсмоэлектрического сигнала определяется интенсивностью сейсмической волны. На ближних пунктах амплитуда сигнала больше. На удаленных пунктах амплитуда сигнала уменьшается в связи с ослаблением сейсмической волны. Сейсмоэлектрический сигнал проявился в пунктах, где по данным МТЗ в верхних частях земной коры на глубинах 300–1000 м находится проводящий слой, связываемый с осадочными породами, по-видимому, насыщенными минерализованными водами. Слой, возможно, имеет гидродинамическую связь через трещины и разломы с приповерхностным обводненным слоем. Сейсмоэлектрический сигнал может быть обусловлен электрокинетическим эффектом, а также смещением электродов в результате действия сейсмической волны от землетрясения.

В п. Быстрая в поведении электрического поля внутриземных источников, выделенного путем фильтрации из естественного электрического поля Земли, выявлена бухтообразная аномалия интенсивностью 100 мВ/км, связываемая с Култукским сильным землетрясением. Аномальное изменение электрического поля началось за 40 суток до землетрясения. Аномалия не связана с дождевыми осадками и другими метеорологическими явлениями. Она также не вызвана магнитной бурей. Аномалия по времени и форме согласуется с подъемом уровня воды в скважине, расположенной в 14 км от пункта Быстрая. Предполагается, что в связи с землетрясением увеличились тектонические напряжения в земной коре, которые вызвали поднятие уровня подземных вод. В результате возникли электрокинетические, электрохимические и другие эффекты в верхних частях земной коры, которые проявились аномальным изменением напряженности электрического поля, которое является предвестником сильного Култукского землетрясения.

В п. Быстрая в поведении вещественной части электрического типпера, характеризующего геоэлектрическую неоднородность среды, выявлено аномальное изменение в виде бухтообразной вариации, которая связывается с Култукским землетрясением. Вариация предвещает и сопровождает землетрясение. Аномальные изменения произошли за 10–15 суток до землетрясения. Интенсивность аномалии превышает дисперсию в несколько раз и составляет 0.4. В поведении мнимой части типпера аномалия не выражена. Это свидетельствует, что аномалия связана в основном с вкладом активных токов и вертикальное электрическое поле. Аномалия согласуется с подъемом уровня воды в п. Талая. Предполагается, что аномалия вещественной части электриче-

ского типпера связана с подъемом уровня воды, которое привело к уменьшению степени геоэлектрической неоднородности среды. Выявленный аномальный эффект в поведении электрического типпера является предвестником сильного Култукского землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В.* Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне // *Физика Земли*. 1999. № 10. С. 3–25.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 677 с.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ. Глубинное строение.... / Под ред. Пузырева Н.Н. Новосибирск: Наука. 1984. 172 с.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д.* Связь электромагнитных волн Pс1 с землетрясениями // *Физика Земли*. 2011. № 6. С. 28–34.
- Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С.* Недр Байкала / Под ред. Пузырева Н.Н. 1981. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 105 с.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др.* Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2001. 250 с.
- Мороз Ю.Ф., Напылова О.А.* Краткосрочные предвестники землетрясений в вариациях низкочастотных магнитотеллурических матриц // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 5. С. 67–76.
- Мороз Ю.Ф.* Предвестники сильных землетрясений в низкочастотном электромагнитном поле Камчатки // *Физика Земли*. 1996. № 5. С. 58–62.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т.* Методика и результаты мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне // *Физика Земли*. 2007. № 11. С. 37–49.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Буглова С.Г.* Вертикальная и горизонтальная составляющие электротеллурического поля на оз. Байкал и их связь с электропроводностью среды // *Физика Земли*. 2008. № 3. С. 73–83.
- Попов А.М.* Глубокие слои высокой электропроводности по данным магнитотеллурического зондирования. Заметки по структуре Байкальского рифта. Новосибирск: Наука. С. 41–54.
- Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. М.: Митр. 1979. С. 388.
- Рокитянский И.Н.* Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: изд-во “Наукова Думка”. 1975. 279 с.
- Соболев Г.А., Морозов В.Н.* Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями. Физические основы поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука. 1970. С. 110–121.
- Corwin R.F., Morrison H.F.* Self potential variations preceding earthquakes in central California // *Geophys. Res. Lett.* V. 4. 1977. P. 171–174.
- Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S.* Robust smooth magnetotelluric transfer functions // *Geophysical Journal International*. 1996. V. 124. P. 801–819.
- Mizutani H., Ishido T., Yokokura T., Ohnishi S.* Elektrokinetic phenomena associated with earthquakes // *Geophys. Res. Lett.* V. 3. 1976. P. 365–368.
- Myachkin V.I., Sobolev G.A., Dolbikina N.A., Morozov V.N., and Preobrazensky V.B.* The study of variations in geophysical fields near focal zones of Kamchatka // *Tectonophys.* V. 14. 1972. P. 287–293.
- Nagao T., Orihara Y., Yamaguchi T., Takahashi I., Hattori K., Noda Y., Saynag K., Uyeda S.* Co – seismic geoelectric potential changes observed in Japan // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. 2000. P. 1535–1538.
- Noritomi K.* Application of precursory geoelectric and geomagnetic phenomena in China. Report by Japanese Seism. Soc. Delegation to People’s Republic of China, Skism. Soc. Japan. 1978. P. 57–87 (in Japanese, for English translation, *Stt Chinese Geophys.* V. 1. № 2. P. 377–391. Amer.geophys. Union).
- Mogi T., Tanaka Y., Widarto D.S., Arsadi E.M., Puspito N. T., Nagao T., Kanda W, Uyeda S.* Geoelectric potential difference monitoring in Ssouthern Sumatra, Indonesia – Co-seismic change // *Earth Planets Space.* V. 52. 2000. P. 245–252.
- Varotsos P., Alexopoulos K.* Physical properties of variations of the electric fields of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude // *Tectonophys.* V. 110. 1984. P. 99–125.
- Varotsos P., Alexopoulos K., Lazaridou M.* Latest aspect of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals // *Tectonophys.* V. 224. 1993. P. 1–37.
- Widarto D.S., Mogi T., Tanaka Y., Nagao T., Hattori K., Uyeda S.* Co – seismic geoelectrical potential changes associated with the June 4, 2000’s earthquake (Mw7.9) in Bengkulu, Indonesia. *J. Physics and Chemistry on the Earth.* 2008. P. 152–163.