

ЛОКАЛЬНАЯ ГЕОМАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ ЦКАЛИЦМИНДА-УРЕКИ, КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК ОНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

З.А. Кереселидзе

Институт геофизики им. М.З. Нодия, 0171, ул.М. Алексидзе 1, www.ig-geophysics.ge
Грузинский университет им. Андрея Первозванного Патриаршества Грузии

Аннотация

Локальная геомагнитная аномалия Цкалицминда-Уреки может оказаться уникальным геофизическим полигоном для проверки теории генезиса малых аномалий с резкими градиентами геомагнитного поля. Согласно предварительным результатам электромагнитной разведки эта территория может считаться также аномальной своими геоэлектрическими характеристиками, которые вероятно складываются вследствие совместного действия нескольких факторов: просачивания морской воды внутрь пористой прибрежной среды; эффекта электролитической поляризации при движении жидкой проводящей фракции по каналам между намагниченными породами; накопления свободных и связанных поляризационных зарядов и их релаксации через теллурические токи и электромагнитное излучение. Такие качества данной геомагнитной аномалии могут быть использованы для проверки модели собственных электромагнитных колебаний локального сегмента системы Литосферы-Атмосферы-Ионосферы, созданной для объяснения механизма генерации ОНЧ электромагнитного излучения в эпицентральной зоне будущих землетрясений.

Введение. Детальное исследование геомагнитного поля в районе Черноморского курорта Цкалицминда-Уреки (условный центр - точка с координатами $N = 42^{\circ}00'536", E = 41^{\circ}45'451"$) началось в последнем десятилетии прошлого столетия. Интерес к этой локальной геомагнитной аномалии исторически связан с тем фактом, что это место является целебным, по мнению медиков, по причине т.н. «магнитных песков», составляющих пляжную зону. Однако, по мере накопления и анализа данных наблюдений, появились веские аргументы, свидетельствующие об уникальности данного места, как комплексного геофизического полигона. В частности, появилась гипотеза, согласно которой специфические электромагнитные условия, определяемые существованием геомагнитной аномалии непосредственно в береговой зоне, могут способствовать генерации электромагнитного излучения в диапазоне очень низкочастотных (ОНЧ) волн. По своей сути это излучение может иметь подобие с электромагнитным излучением, которое часто фиксируются вблизи эпицентров будущих землетрясений [Uoshino,19991; Molchanov et al,1993; Nayakava and Molchanov,2002]. Возможной причиной такого явления может оказаться реализация условий, необходимых для эффективной электрической поляризации пород, создающих магнитную аномалию. Эти условия должны быть обусловлены одновременным действием факторов пористости прибрежной среды, богатой магнетитом, соленой морской водой и резкими градиентами геомагнитного поля. Следовательно, особый интерес к исследованию физического механизма этого излучения в сейсмичеки мало активном месте можно считать вполне оправданным с точки зрения проблемы физических механизмов земного ОНЧ электромагнитного излучения, являющегося электромагнитным индикатором землетрясений. Отметим, что кроме ОНЧ электромагнитного излучения, в зоне обсуждаемой геомагнитной аномалии могут генерироваться локальные периодические геомагнитные возмущения, типа крайне низкочастотных колебаний (КНЧ), связанные с

теллурическими токами. Нельзя исключить также космический эффект, заключающийся в возмущающем влиянии геомагнитной аномалии на слабоионизированную ионосферную плазму. Например, из-за взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами усилятся магнитная вязкость среды, что может существенно влиять на спектр магнитогидродинамических волн, генерированных в D- области [Kereselidze et al, 2010].

Локальная геомагнитная аномалия Цкалцминда-Уреки состоит из двух, разделенных малым расстоянием частей, координаты условных центров которых указаны на аэрокосмическом снимке (рис.1). На рис.2 дана картина центрального фрагмента аномального геомагнитного поля первой части, которая простирается вдоль берега моря. В настоящее время этот фрагмент находится внутри территории оздоровительного комплекса «Имедис калаки», строительство которого вероятно начнется в неопределенном будущем. Данная картина построена по последним измерениям абсолютного значения геомагнитного поля, проведенным в 2006-2007 гг. Как видно, тут, несмотря на относительно малую разность между экстремальными значениями геомагнитного поля, фиксируются его достаточно крутые градиенты, характерная величина которых порядка 100 нТ/10м. В качестве нормального значения абсолютной величины геомагнитного поля использовалась реперная величина 48800 нТ, определенная для региональной геофизической обсерватории Душети ($N = 42^{\circ}05'41''$, $E = 44^{\circ}42'11''$) в соответствующий период времени

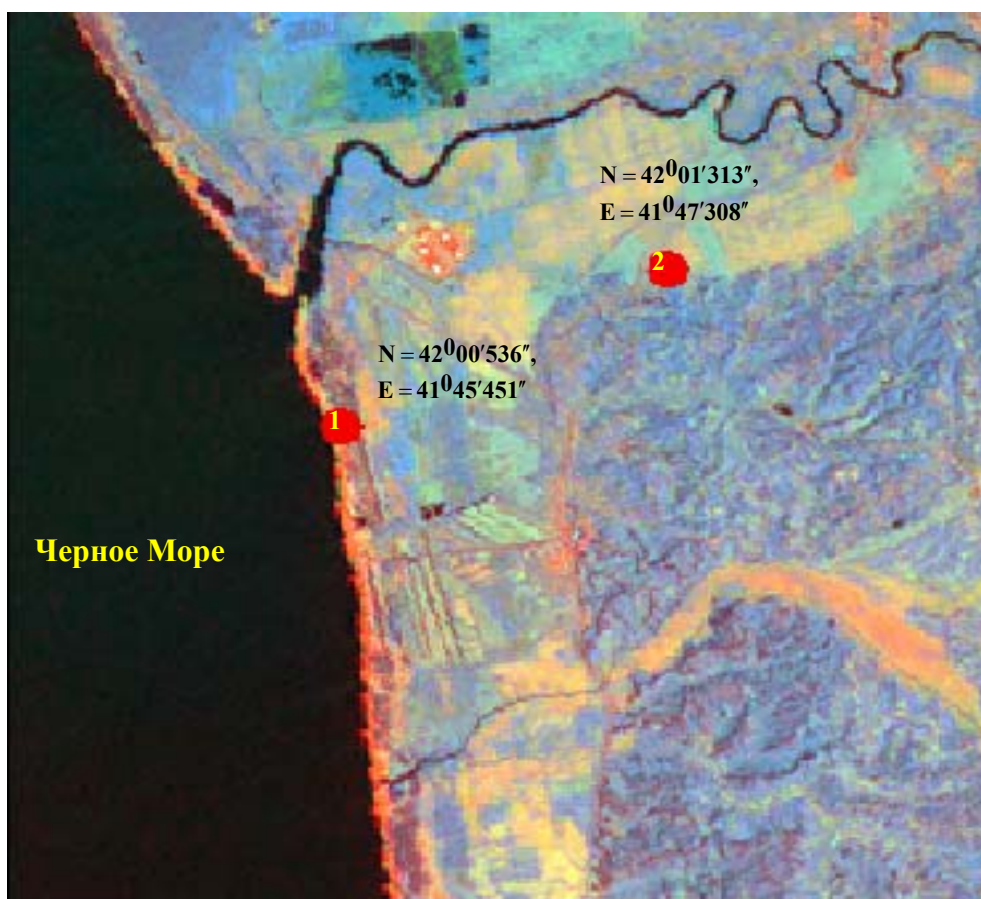


рис.1

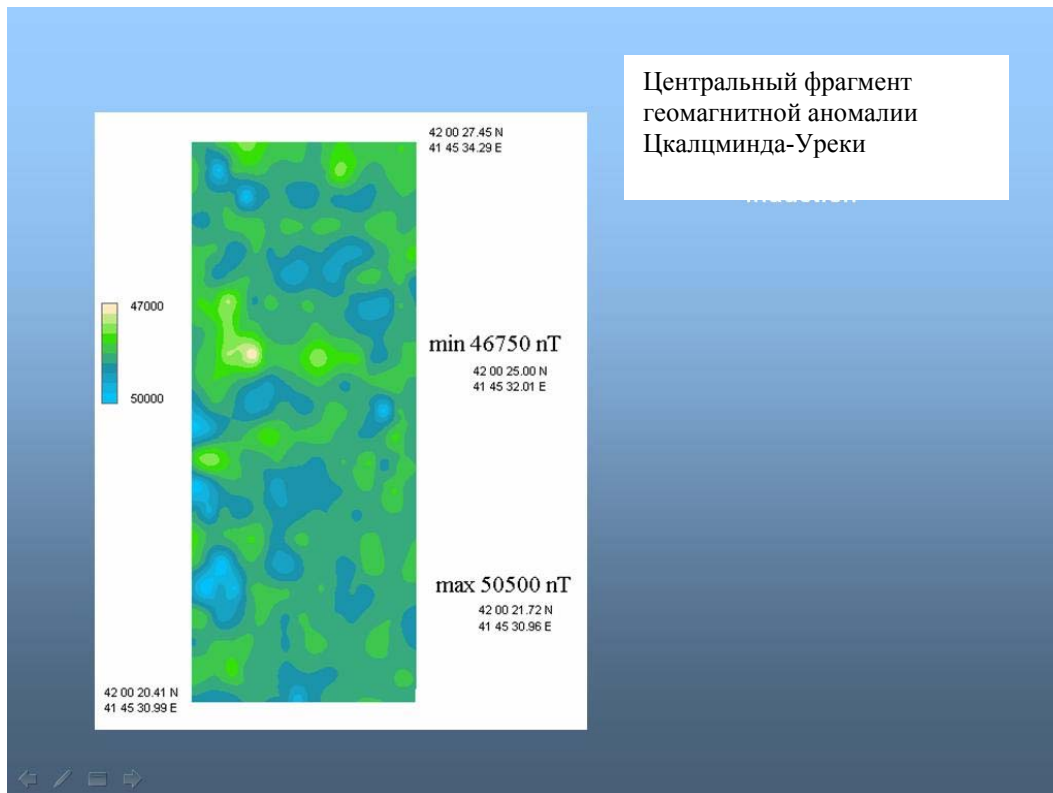


Рис.2

Несмотря, на недостаточную информативность этой картины, тем не менее, полновесная интерпретация данных измерений представляется достаточно сложной. Однако, исходя из характера аномалии, можно предположить, что расположенное в глубине магнитное тело, вызывающее аномалию, должно иметь сложную структуру. Электрометрические измерения, результаты которых будут показаны ниже, также не дали такую информацию, которая была бы достаточной для полного представления о глубинной геологической структуре данного места. Исходя из имеющегося материала, можно лишь предположить, что электромагнитная структура центра аномалии может соответствовать некоторому модельному представлению. Согласно этой модели, справедливой лишь с определенной долей вероятности, здесь под достаточно мощным слоем песчаных отложений присутствуют разбросанные магнитные тела небольших размеров. Именно хаотическое расположение этих тел может быть причиной чередования знака градиента аномального геомагнитного поля. В случае их грубой аппроксимации эти тела могут быть представлены фигурами регулярной формы, например, намагниченными сферами или стержнями. Наряду с такой моделью теоретически также имеет право на существование еще одна почти фантастическая версия происхождения столь резко неоднородной геомагнитной аномалии. Если под слоем пласта песка находится магнитный мультиполь, то причина знакопеременного характера градиентов геомагнитного поля будет вполне понятной. Но такое очень трудно представить, и еще более сложно объяснить генезис такого образования. Мультипольную структуру имеет, например, магнитное поле Марса, однако её пространственные масштабы огромны, по сравнению с размерами локальной магнитной аномалии Цкалцминда-Уреки.

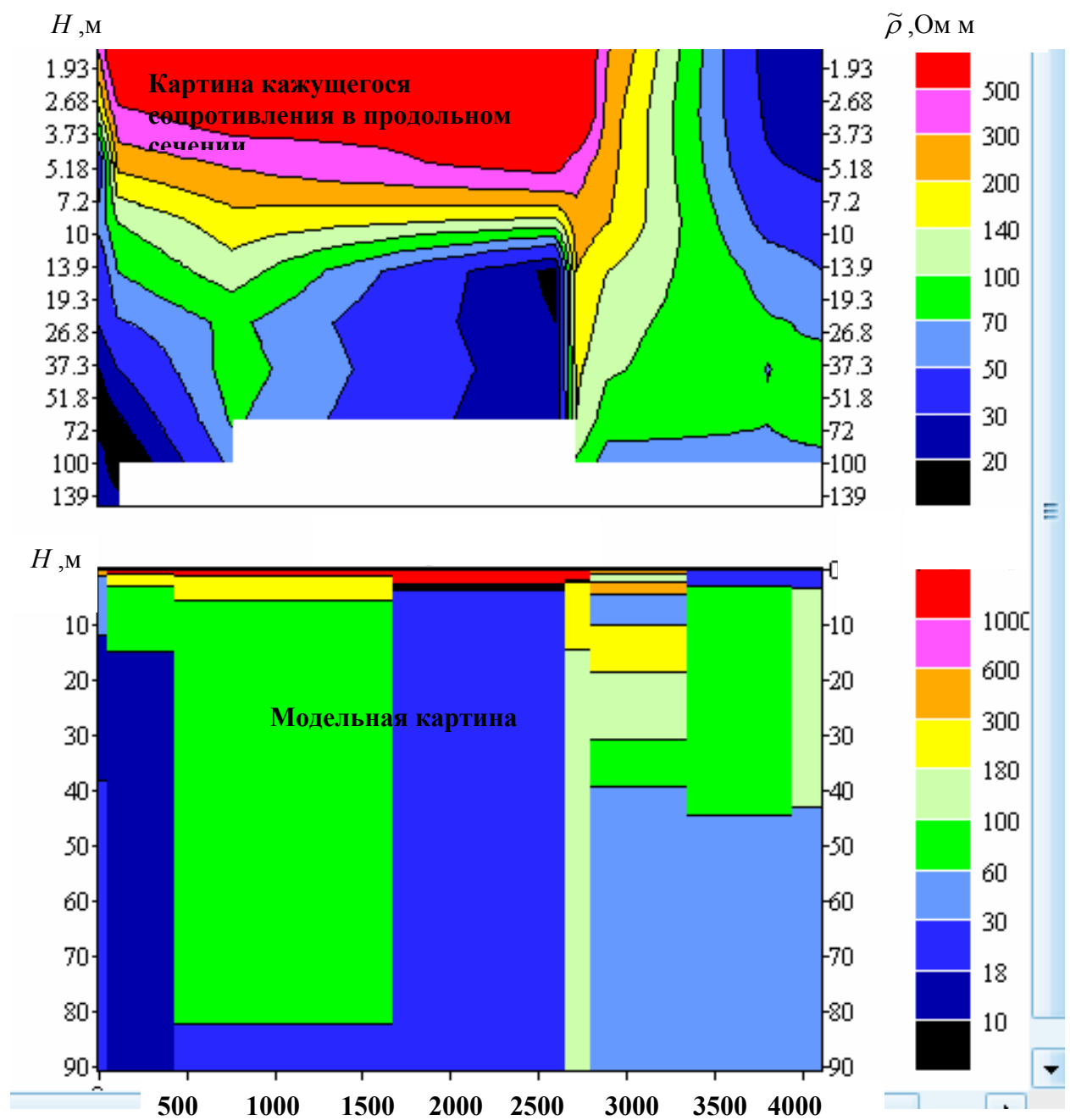


Рис.3а,б

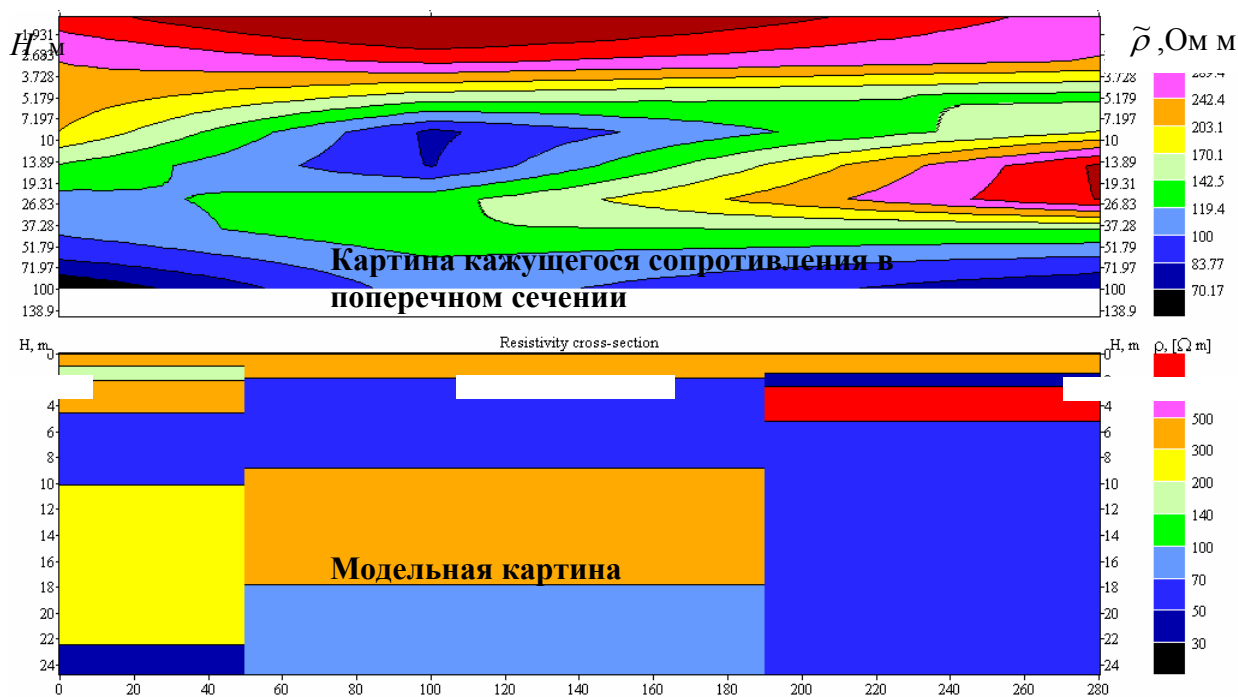


Рис.4а,б.

Геоэлектрический разрез центрального фрагмента магнитной аномалии Цкалцинда-Уреки. В 2006-2007 гг. были проведены измерения геоэлектрических характеристик обеих частей локальной геомагнитной аномалии и примыкающих к ним территорий. В результате была получена глубинная картина, позволяющая судить о качествах пород, образующих прибрежную зону. Для определения параметров среды был использован метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Он оказался достаточно эффективным, т.к. орография территории здесь довольно простая, и разность гипсометрических уровней на четырехкилометровом участке вдоль берега моря составляет всего 8м. Для построения трёхмерной модели электрической неоднородности (аномалии) на исследуемой территории в будущем, следует провести сеточные электрометрические измерения. Полевые данные были интерпретированы компьютерной программой, при помощи которой построены трёхслойные кривые ВЭЗ (в основном Q, H и K типов). Вдоль профиля длиной 4 км, следующего параллельно береговой линии, был получен разрез кажущегося сопротивления, а также модельный геоэлектрический разрез, доходящий до глубины 90 м (рис.3а,б). В частности, по кривым типа Q мощность первого слоя достаточно большая и означает распространение теригенного материала преимущественно в северном направлении. Оконтуривание этого слоя в одномерном представлении показывает, что тут залегает геологическое тело с высоким удельным электрическим сопротивлением: $\tilde{\rho} \sim 1000-2000 \text{ Ом.м}$. Характерные пространственные размеры этого тела: длина- 2500 м, ширина-240 м, толщина -2 м..Вероятной причиной появления такого тела является р. Супса, палео пойме которой, видимо, принадлежит центральный фрагмент геомагнитной аномалии [Berishvili et al., 2008]. На рис.4а,б показан перпендикулярный морской линии разрез, длина которого составляет 280 м, глубина-24 м. Он соответствует поперечному сечению в пределах центрального фрагмента магнитной аномалии (рис.2). Из этих рисунков представляется вполне очевидным, что дифференциация составных пород локальной магнитной аномалии Цкалцинда-Уреки по удельному электрическому сопротивлению достаточно контрастная. Такая особенность позволяет считать данное место аномальным также и по геоэлектрическим параметрам. Однако, для надежного определения литологического состава пород в зоне обсуждаемой геомагнитной аномалии необходимы дополнительные

исследования не только методом электрорметрии, но и другими геофизическими методами, в первую очередь, сейсмической разведки.

Эффект электрической поляризации пород в условиях геомагнитной аномалии.

Результаты анализа геоэлектрической разведки свидетельствуют, что глубинная структура центрального фрагмента локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки весьма неоднородна. Значительные осложнения, возникающие при измерениях, вероятно, указывают на то, что находящиеся в вмещающей среде породы одновременно могут проявлять электрические качества как проводников, так и диэлектриков. Вообще, резонно предположить, что аномальное магнитное поле может порождать такое же аномальное геоэлектрическое поле. Очевидно, что частоту изменения локального геоэлектрического поля должны задавать текущие тут теллурические токи, область замыкания которых вероятно ограничена объемом магнитной аномалии. Кроме этого, в пористой, насыщенной морской водой среде, из-за разложения минеральных примесей особенно активно должен проявляться фактор ионизации глубинной среды [Краев,1951; Кобранова,1986]. Этот факт может активно влиять на интенсивность теллурических токов. Переменное электрическое поле, связанное с токами, можно считать внешним по отношению к породам, образующим берег моря. Это поле может существенно менять электрические качества пород. В частности, в насыщенной морской водой пористой намагниченной среде могут развиваться электрокинетические процессы, а также макро поляризация, т.е. накопление зарядов. Процесс перераспределения этого заряда будет зависеть от электрической проводимости среды. Обычно скорость перераспределения избыточного заряда связана со временем релаксации заряда, т.е. зависит от степени неоднородности среды. От нее также зависят энергетические потери, связанные с джоулевым тепловыделением, и потери на электромагнитное излучение. Интенсивность последнего явления находится в прямой зависимости от глубинного процесса накопления свободных и связанных поляризационных зарядов. Теллурические токи также могут генерировать электромагнитное излучение в открытое пространство. Таким образом, в зоне локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки под воздействием внешнего переменного электрического поля вполне могут реализоваться макроскопические условия, необходимые для генерации ОНЧ электромагнитных волн. Касаясь проблемы электромагнитного излучения в прибрежной зоне, в первую очередь необходимо отметить, что земля и морская вода являются особыми средами. Под воздействием внешнего электрического поля они проявляют качества хороших изоляторов при высоких частотах и хороших проводников -при низких частотах [Шомони, 1964; Краев, 1951]. Однако, такая общая качественная особенность не является достаточной для полноценного анализа электромагнитных эффектов в зоне магнитной аномалии. Например, если в какой-либо ее части, состоящей из различных пород, возникнут слабые токи смещения, плотность которых мала по сравнению с плотностью тока проводимости, то такую породу следует считать неидеальным проводником. В противном случае, когда плотность токов проводимости мала по сравнению с плотностью токов смещения, зависящих от связанных поляризационных зарядов, порода является несовершенным изолятором, т.е. диэлектриком. Следовательно, в аномальной зоне электрическая проводимость и частота изменения электрического поля определяют, следует ли рассматривать конкретную породу в качестве диэлектрика или же проводника.

Известно, что в любой среде критерием для такого деления является параметр $\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}$, где ε –

диэлектрическая проницаемость среды, σ -удельная электрическая проводимость, ω -частота электрического поля. В зависимости от величины этого параметра, одна и та же порода при низких частотах может являться проводником, при высоких- изолятором. Но такая зависимость электрической проводимости от частоты, справедливая для большинства пород, не является характерной для металлических проводников. Также известно, что диэлектрические качества хороших изоляторов сохраняются в достаточно широком диапазоне частот изменения внешнего электрического поля [Кобранова,1986]. Поэтому

среда геомагнитной аномалии, исходя из неоднородности ее породного состава, может проявлять различные электрические качества. В частности, тут, наряду со слабо проводящими песками, а также слабоцементированными песчаниками и известняками, присутствует хороший проводник, магнетит. Кроме этого, в любом случае, поляризация породы означает разделение носителей электрического заряда, что эквивалентно появлению некоторого электрического момента. Именно в процессе поляризации проявляется роль переменного электрического поля, которое, в отличие от постоянного поля, может мешать стабилизации электрического момента. Известно, что этот параметр, соответствующий единице объема породы, равен вектору поляризации $\mathbf{P}$. Наряду с ним, в поляризованной среде может также возникнуть магнитный момент $\mathbf{M}$, связанный с теллурическими токами, питающимися свободными поляризационными зарядами. Именно наличие этих параметров, постоянно меняющихся под воздействием внешнего переменного электрического поля, является необходимым условием для генерации электромагнитного излучения.

Таким образом, причины, обуславливающие электрическую поляризацию пород, создающих обсуждаемую магнитную аномалию, могут быть весьма разнообразными. Например, тут присутствуют т.н. ионно-проводящие породы, вроде песков, составляющих основу пляжа. В этих породах, находящихся под воздействием внешнего электрического поля, возможны упругие смещения внутри атомов и молекул, а также эффект пространственной миграции и диффузионного перераспределения концентрации носителей заряда. Присутствие в значительном количестве такого рудного включения, как магнетит, т.е. электронно -проводящей фракции, вряд ли может существенно сказываться на суммарной поляризации. Однако, нельзя исключить влияние электролитических процессов, возможно весьма интенсивных из-за пористости песков, т.е. миграции морской воды вглубь породы [Кобранова,1986]. Также, необходимо отметить, что различные типы поляризации должны иметь различные характерные времена смещения не только носителей зарядов, но и скорости релаксации неоднородности их распределения. Поэтому, эти характерные времена меняются в очень широком диапазоне, от долей микросекунд до часа и более. Однако, для простой оценки времени релаксации свободного заряда достаточно обратиться к уравнению неразрывности

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где- $\mathbf{j}$ плотность тока, ρ -плотность заряда.

Из (1), если воспользоваться условием: $\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \rho$, будем иметь

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t}, \quad (2)$$

где ρ_0 -характерная плотность заряда, $\varepsilon = \varepsilon' \varepsilon_0$ (ε' , и ε_0 -относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости). Следовательно, параметр $\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ определяет скорость убывания зарядовой неоднородности в среде. Например: для морской воды характерна величина $\tau = 2 \cdot 10^{-10}$ с, для плохо проводящей дистиллированной воды - $\tau < 10^{-6}$ с, для хорошего изолятора, плавленого кварца- $\tau > 10^6$ с.

Переменное внешнее электрическое поле меняет не только условия поляризации, но также влияет на процесс ее релаксации. Обычно, в сложной среде, с ростом частоты электрического поля, круг возможных типов поляризации существенно сужается. Происхождение геомагнитных аномалий, как правило, связано с глубинными метаморфическими процессами, а также с явлением остаточной намагниченности, сообщающей породам некоторую электромагнитную инертность. Поэтому, даже на фоне интенсивных теллурических токов, магнитные аномалии могут иметь достаточно медленно

меняющиеся характеристики. Следовательно, сами по себе они вряд ли могут быть причиной генерации достаточно высокочастотных геоэлектрических полей. Однако, такое утверждение может оказаться недостаточно справедливым в некоторых, особых случаях. Например, нельзя исключить влияние на магнитную аномалию глобальных геомагнитных возмущений. Геомагнитные бури часто могут сопровождаться магнитосферными ОНЧ и КНЧ электромагнитными излучениями, которые могут возмущать земное электромагнитное поле и менять его частотные характеристики. В определенных условиях из зоны магнитной аномалии также может возникнуть эффект переизлучения электромагнитных волн. Появлению в зоне магнитной аномалии переменного электрического поля может также способствовать такой локальный фактор, как просачивание морской воды сквозь пористую намагниченную среду. Это явление может порождать теллурические токи, подобно МГД эффекту генерации токов Холла при движении проводящей жидкости во внешнем магнитном поле. Но просачивание хорошо проводящей морской воды сквозь пористые породы может привести также к миграционной, т.е. объемной поляризации. Она особенно значительной может оказаться для среды, в которой присутствуют как хорошо проводящие породы, так и диэлектрические включения, вместе с воздушными пустотами. В такой среде, имеющей сложную структуру, на границах раздела различных включений может проявляться межфазовый поверхностный эффект, который тормозит заряженные частицы. В результате торможения может возникнуть переменный электрический дипольный момент, источник генерации электромагнитного излучения. Такой процесс имеет кинетическую сущность и физически подобен механизму, предложенному Фреундом для объяснения ОНЧ электромагнитного излучения из эпицентральной зоны будущего землетрясения [Freund et al., 2006, 2009]. Однако, кинетические механизмы поляризации в твердой породе могут развиваться и в случае отсутствия внешнего электрического поля. Однако, развитие некоторых других типов поляризации как, например: Концентрационно-диффузионной, электролитической или же электроосмотической (перенос электролита через породу из-за градиента электрического поля) без приложения значительной разности электрических потенциалов, исключается.

Таким образом, существуют достаточные предпосылки для аргументации гипотезы, согласно которой в зоне локальной магнитной аномалии Цкалцминда-Уреки могут реализоваться условия, необходимые для перманентной поляризации пород. Эти условия, в основном, определяют два фактора: присутствие плохо проводящих (диэлектрических) пород, способствующих появлению связанных поляризационных зарядов и существование хорошо проводящих включений, также дающих поляризационный эффект, но заключающихся в свободной миграции носителей заряда. Очевидно, что последний фактор в среде должен приводить к выравниванию разности электрических потенциалов. Это означает, что на территории магнитной аномалии должны существовать не только поверхностные, но и глубинные источники генерации электромагнитного излучения: переменные теллурические токи и электрические моменты. Первый источник связан с электрической проводимостью среды, второй- с способностью пород поляризоваться по какой-либо причине. Поэтому, независимо от механизма поляризации, можно определить

абстрактный параметр среды, усредненный вектор суммарной поляризации: $\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i$. При

малых частотах изменения электрического поля, что характерно для квазистационарных теллурических токов, в прибрежной зоне должен максимально проявляться эффект миграционной поляризации. В таком случае суммарная поляризация может значительно возрасти. Для нее можно воспользоваться следующей формулой [Кобранова, 1986]

$$\mathbf{P} = n_0 \alpha \mathbf{E}_{cp},$$

(3)

где n_0 - число диполей в единице объема, α - средний условный коэффициент, характеризующий поляризационные качества породы. Величина этого коэффициента уменьшается в случае неоднородности среды и роста частоты внешнего электрического поля, а также возрастания температуры и давления.

Для качественного анализа процесса электромагнитного излучения в первом приближении, обобщая вышесказанное, можно воспользоваться моделью, использующую аналогию между магнитной аномалией и неоднородной квазинейтральной пространственной системой. Для справедливости допущения квазистационарности такой системы необходимо удовлетворение условия: $\left(\frac{c}{l} \ll T\right)$, где T - характерный период

изменения теллурических токов, $\tau = \frac{l}{c}$ - характерное время распространения

электромагнитного сигнала, l - характерный линейный размер системы. Для того, чтобы магнитное поле квазистационарных токов подчинялось законам стационарного поля, требуется выполнение дополнительного условия замкнутости токов. В таком случае эффект излучения системы (т.е. отождествленной с ней геомагнитной аномалии) можно достаточно просто моделировать при помощи известных соотношений электродинамики. В частности, известно, что электромагнитное поле можно считать квазистационарным лишь вблизи системы. Вдали от нее скалярный и векторный потенциалы, а также интенсивность излучения, однозначно зависят лишь от ее электрического момента. Следовательно, на ионосферных высотах простейшей квазинейтральной системой, эквивалентной локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки, является переменный электрический диполь,

т.е.. вибратор Герца. Известно, что если выполняется условие: $R \ll \frac{\lambda}{2\pi}$, где λ - длина волны

вибратора, R - расстояние до точки наблюдения, интенсивность его электрического и магнитного полей определяется вектором Герца $\mathbf{\Pi}$. Следовательно, для качественного анализа электромагнитного поля вблизи магнитной аномалии, которую в некотором временном интервале считается квазистационарной по причине периодичности теллурических токов, можно воспользоваться известным представлением вектора Герца [Стеттон, 1948] (обозначения, использованные в источнике сохраняются)

$$\mathbf{\Pi}(x, t) = \frac{e^{-i\omega t}}{4\pi\epsilon} \int_V \mathbf{P}_0(R') \frac{e^{ikR}}{R} dV, \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_0 = \int_V R' \rho_0 dV, \quad (5)$$

где ω частота изменения электрического поля, R' - координата, которая меняется в пределах объема квазинейтральной системы, ρ_0 - характерная плотность свободных зарядов.

Поляризация свободных зарядов связана с амплитудой плотности переменного тока: $\mathbf{P}_0 = \frac{i}{\omega} \mathbf{j}_0$.

После разложения выражения (4) в ряд сферических функции, вектор Герца может быть представлен суммой электрических и магнитных мультиполей, расположенных в области, содержащей источники электромагнитного излучения. Однако, на расстояниях, значительно превосходящих размеры системы- $R' \ll R$, существенным является первый

член разложения, соответствующий дипольному электрическому моменту системы:

$$\mathbf{P}^{(1)} = \int_V \mathbf{P}_0 dV$$

$$\mathbf{\Pi}^{(0)} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \mathbf{P}^{(1)} \frac{e^{ikR-i\omega t}}{R}.$$

(6)

Следующий член разложения вектора Герца представляется магнитным диполем и электрическим квадруполем

$$\mathbf{\Pi}^{(1)} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left\{ \left[\mathbf{m}^{(1)}, \text{grad} R \right] - \frac{i\omega}{2} \mathbf{P}^{(2)} \right\} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{kR^2} \right) e^{ikR-i\omega t}, \quad (7)$$

где $\mathbf{m}^{(1)} = \frac{1}{2} \int_V [\mathbf{R}_1, \mathbf{J}_0] dV$ - магнитный дипольный момент. Как видно из выражений (6) и (7), в

случае соизмеримости величин дипольного и квадрупольного электрических моментов с дипольным магнитным моментом, вклад $\mathbf{\Pi}^{(0)}$ в электромагнитное излучение будет примерно в $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ раз превосходить вклад $\mathbf{\Pi}^{(1)}$. Следовательно, в первом

приближении величину вектора Пойнтинга $\mathbf{W}$ будет определять радиационные потери диполя

$$W^{(0)} = \frac{\omega^4}{12\pi} \mu \sqrt{\epsilon \mu} |\mathbf{P}^{(1)}|^2. \quad (7)$$

Формулу (7) можно использовать для оценки интенсивности электромагнитного излучения, исходящего из зоны магнитной аномалии вдали от нее, например, на высоте нижней ионосферы. Однако, для корректности оценки следует определить величину абстрактного электрического диполя, эквивалентного магнитной аномалии. Как эта величина, так и величина магнитного диполя, зависят от плотности свободных поляризационных зарядов, электрической проводимости среды, характерного линейного размера и объема магнитной аномалии (области локализации теллурических токов). Таким образом, основным параметром, определяющим электромагнитное излучение квазинейтральной системы, является электрический диполь. Однако, может возникнуть ситуация, удобная для генерации очень интенсивных теллурических токов. При этом, пространственное распределение этих токов может оказаться таким, что вместо электрического момента определяющим фактором излучения станет магнитный дипольный момент. Такая ситуация представляется наиболее вероятной в случае внешнего электрического поля малой частоты. Как было отмечено, диапазон изменения этого параметра в зоне магнитной аномалии должен определять характерные времена релаксации различных типов поляризации, а также процесс миграции свободных поляризационных зарядов. Поэтому, если фактор теллурических токов преобладает над фактором поляризации следует воспользоваться выражением

$$W^{(1)} = \frac{k^4}{12\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} |\mathbf{m}^{(1)}|^2. \quad (8)$$

Очевидно, что эффект теллурических токов может особенно сказываться в непосредственной близости магнитной аномалии, т.е. на расстояниях, для которых дипольное приближение не является справедливым и для вектора Герца следует

пользоваться формулой (4). Таким образом, характер электромагнитных возмущений, возникающих в зоне локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки, может быть определяется «блуждающими» теллурическими токами. Их эффект, подобно эффекту изменения плотности связанных поляризационных зарядов, может также проявляться в генерации электромагнитных волн. Проверка этой гипотезы требует наличия достаточно полных данных о частотно-амплитудных характеристиках земного электромагнитного излучения. Необходимы также специальные электрометрические измерения с целью определения пределов изменения величины плотности поляризационных зарядов и оценки интенсивности теллурических токов в зоне обсуждаемой геомагнитной аномалии. После накопления достаточной информации будет возможна полноценная интерпретация данных наблюдений, которая должна проводиться по схеме, позволяющей количественно подтвердить причинно-следственные связи между различными параметрами, аналитически установленные посредством вышеприведенных формул.

Обсуждая вопрос механизма генерации и проблему моделирования электромагнитного излучения, связанного с геомагнитной аномалией, нельзя исключить возможность развития эффекта собственных электромагнитных колебаний данного сегмента прибрежной зоны. Эти колебания, как и электромагнитное излучение, также могут быть вызваны поляризационными зарядами, независимо от механизма их накопления. Поэтому, можно воспользоваться моделью, предложенной в работах [Kachakhidze et al.,2011; Kachakhidze et al.,2012], согласно которой в области повышенной сейсмической активности может образоваться электромагнитный контур, соответствующий определенному сегменту Литосферы-Атмосферы-Ионосферы. Собственные колебания такого контура являются источником ОНЧ волн и обеспечиваются поляризационными зарядами, накопившимися вблизи поверхности земли. Эти заряды индуктивно влияют на верхнюю атмосферу (нижнюю ионосферу), которая на определенном линейном масштабе меняет полярность. Нижняя (критическая) частота собственных электромагнитных колебаний такого контура, подобного отрезку двухпроводной линии, определяется формулой

$$\omega = \frac{c}{l}, \quad (9)$$

Где l -характерный линейный масштаб, максимальная величина которого соответствует длине магистрального разлома в эпицентре будущего землетрясения, c -скорость света.

Из рисунков электрометрического разреза геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки видно, что ее линейный размер является неоднозначным и может меняться в пределах 0.3-4 км. По этой причине из формулы (9) получим характерный интервал частот собственных электромагнитных колебаний 75-1000 КГц. Следовательно, если в спектре локального электромагнитного излучения будут доминировать волны с частотами, находящимися внутри этого интервала, то можно считать, что ОНЧ электромагнитное излучение является следствием собственных электромагнитных колебаний геомагнитной аномалии. В таком случае можно предположить аналогию между глубинными процессами, происходящими в местах, отличающихся по уровню сейсмической активности, но дающих одинаковый электромагнитный эффект. Это означает, что в процессе подготовки землетрясения в области ее будущего эпицентра могут реализоваться такие же физические условия, какие существуют в области геомагнитной аномалии. Поэтому, является очевидным, что исследование электромагнитных эффектов в зоне обсуждаемой геомагнитной аномалии, кроме самостоятельного интереса, безусловно имеет общее значение. В первую очередь, такое соображение оправдано важностью проблемы, заключающейся в неопределенности механизма генерации ОНЧ излучения в зонах повышенной сейсмической активности. Без решения этой проблемы перспективы ОНЧ излучения, как электромагнитного предвестника землетрясений, представляются в значительной степени спорными. .

Геологические характеристики зоны локальной магнитной аномалии Цкалцминда-Уреки. В связи с генезисом локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки возникает вопрос: имеют ли вообще общую основу геомагнитные и геоэлектрические аномалии, или это вовсе не обязательно? Если геоэлектрическая аномалия Цкалцминда-Уреки вызвана только теллурическими токами, то на всем Черноморском побережье Грузии должны существовать подобные аномалии. Однако, только известно, что на этом участке морского берега других магнитных аномалий нет. Вопрос существования электрических аномалий пока что следует считать открытым. Вероятно, что своими тонкими электромагнитными характеристиками возможные геоэлектрические аномалии все же будут отличаться... Поэтому, можно предположить, что в зоне Цкалцминда-Уреки, магнитная и электрическая аномалии в значительной степени вызваны одними и теми же причинами. Естественно, что среди этих причин главной должна являться локальная геологическая структура.

Установлено, что в позднем плейстоцене (18-17 тысяч лет до н.э.), на главной стадии последнего периода оледенения, уровень Черного моря менялся в пределах /100-110/ м. от современной отметки. Во время максимальной регрессии прибрежная полоса Черного моря находилась на /2.5-3.5/ км. западнее современного берега, рельеф которого характеризовался значительной крутизной. Затем, на начальной стадии трансгрессии моря, ее ранний берег полностью оказался под водой. Затем, в среднем голоцене, когда уровень моря повысился до отметки /+4.5 – +5/ м, береговая линия проходила на 7-8 км. восточнее современной линии. Затем последовали изменения уровня моря с относительно малыми амплитудами (промежуточная регрессия, трансгрессионная фаза нового Черного моря, фанагорическая регрессия). Наконец, после окончания нимфовой регрессии, происшедшей 1100-1200 лет тому назад, береговая линия моря приняла современный вид. В процессе установления береговой линии особую роль сыграли впадающие в море реки. Очевидно, что наслоения вдоль береговой линии моря в значительной степени сформированы за счет терригенных материалов, мобилизованных ими. В частности, в грузинском секторе морского побережья наиболее эффективны системы двух крупных рек: Чорохи (юг) и Риони (север). Риони выносит основную массу песков, Чорохи снабжает побережье поздно протерозойским, палеозойским и мезозойским материалами, которыми построены анатолийский горный массив и складчатая полоса Аджара-Триалети. Однако, в районе между основными реками действует подсистема рек Супсы и Натанеби, которая занимает определенное место в вышеуказанной системе. Эта подсистема характеризуется некоторыми собственными признаками, хотя ее действие в основном не отличается от берегообразующего действия главной системы. В частности, маленькие реки, Супса и Натанеби, питающие побережье в зоне Уреки-Цкалцминда, также приносят Базальты ($\rho \sim 10^3$ Ом м), Трахибазальты, Андезиты ($\rho \sim 5 \cdot 10^2 - 10^4$ Ом м), Диабазы ($\rho \sim 6 \cdot 10^6$ Ом м), Трахиты и Туфы, т.е. палеогенные вулканогены и вулканогенно-осадочные материалы. Очевидно, что в бассейнах этих рек, в условиях, относительно спокойных, чем в бассейнах крупных рек, происходила глубокая сепарация приносимых материалов по их удельному весу. При сепарации в первую очередь выносятся минералы легкой фракции, в сопровождении определенной концентрации минералов тяжелой фракции. Мобилизация последних в прибрежной полосе происходит из-за сезонного возрастания энергии рек. Поэтому, в тонкозернистом песке, составляющем основу пляжа, присутствует около 72-97 % тяжелой фракции, в основном представленной Магнетитом (32-71%, $\rho \sim 10 - 10^5$ Ом м) и Пироксеном (21-38%, $\rho \sim 10^5 - 10^6$ Ом м). Характерный диаметр зерен песка 0.16-0.29 мм и содержание в нем Пирита, Эпидота, Биотита и Циркония является незначительным. Но содержание магнетита является достаточно высоким по причине действия следующих факторов: 1. провинция, снабжающая побережье Уреки-Цкалцминда инертным материалом, богата Пироксен-Магнетитом; 2. прибрежная зона полностью построена на песчаных ($\rho \sim 5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^3$ Ом м) отложениях и

имеет особенные динамические качества. В частности, тут в условиях глубокой сепарации песок ($\tilde{\rho} \sim 10^{-1} - 2,5 \cdot 10^3$ Ом м) мелко алевритного размера наносится на подводный склон, в то время, как составляющий тяжелую фракцию Фсамитский и крупноалевритный материалы остаются на берегу. Поэтому, на пляже в направлении от моря постепенно уменьшается характерный размер образующего материала и увеличивается содержание магнетита, кристаллы которого имеют диаметр 0.25-0.1 мм. Отметим, что по данным аэромагнитной съемки, проведенной в советскую эпоху, обозначается существование достаточно сильной магнитной аномалии, распространяющейся от берега в сторону моря на 4-8 км. Эту аномалию связывают с новозвксинской регрессией [Твалчредидзе и др., 2002], но такое предположение требует дополнительной проверки. Очевидно, что для этого необходимо детальное геофизическое исследование данного места.

Геофизическая модель локальной геомагнитной аномалии Цкалицминда-Уреки .

На границе раздела атмосферы и Земли величина естественного электрического поля может иметь скачок, величину которого определяет плотность поверхностного заряда, зависящая от орографии земной поверхности и геофизических характеристик среды. Поэтому, наиболее простая электромагнитная картина соответствует модели, в которой поверхность раздела считается эквипотенциальной. Очевидно, что такая идеальная модель предполагает отсутствие «блуждающих» токов на земной поверхности, что означает отсутствие неоднородности свободных электрических зарядов. Однако, кроме свободных зарядов, если в пограничном слое Земли присутствуют диэлектрические породы, также могут существовать связанные поляризационные заряды и генерируемые ими токи смещения. Поэтому, исходя из сугубо неоднородного характера обсуждаемой геомагнитной аномалии, резонно предположить, что под слоем песков, в глубине беспорядочно разбросаны намагниченные тела (магнитные жилы) различных размеров и магнитной полярности, являющиеся также центрами скопления связанных поляризационных зарядов. Такое представление является вполне реальным, если учесть, что магнитная аномалия вероятно находится в древнем русле р. Супсы. Следовательно, существенные помехи, возникающие во время электрометрической разведки геомагнитной аномалии, вероятно вызванные поляризацией пород, вполне объяснимы. Очевидно, что хаотическое расположение поляризационных центров не может помешать суперпозиции их эффекта, выражением которого является аномальный характер геоэлектрического поля.

Механизм электролитической поляризации пористой намагниченной среды предполагает существование микротрещин в твердых породах, находящихся под поверхностным слоем песков. Вполне вероятно, что эти микротрещины могут служить каналами, по которым движется жидкая проводящая фракция. Например, давно существует интересная геологическая модель Л.Берсудского, объясняющая механизм заполнения микротрещин высокотемпературными, активными эманациями, связанными с интрузиями [Логачев, 1951]. В свое время эта модель была использована для объяснения генезиса особенно неоднородных геомагнитных аномалий малых размеров, обнаруженных в восточной Сибири, Ангара-Илимском бассейне. Эти аномалии отличаются от большинства известных аномалий резкими градиентами геомагнитного поля, чем имеют некоторое подобие с обсуждаемой нами геомагнитной аномалией. Представление Берсудского опиралось на геологической теории, объясняющей механизм генезиса богатых рудой мест. Согласно этой теории, на первой геологической стадии должна была произойти сильная метаморфизация вмещающей среды (песчанники, мергели, глины), сопровождаемая мощным смешиванием магнетита. Берсудский предположил, что такой процесс мог быть особенно сильным вблизи микротрещин, выполнявших функцию своеобразных каналов в твердой породе, по которым текли эманации. В процессе охлаждения среды обогащенные магнетитом метаморфизированные породы проходили через точку Кюри, в которой магнитная восприимчивость минералов достигала максимума. Из-за значительной величины коэрцитивной силы, что характерно для большинства горных пород, застывшие в трещинах эманации, которые можно называть магнитными жилами, сохранили высокую степень

намагниченности. В Ангара-Илимском случае такая намагниченность пород значительно превосходит намагниченность, возникающую естественным путем, т.е. вызванную в охлажденных породах геомагнитным полем. Возможно также дополнительное обогащение микротрещин магнетитом, выкристаллизованным из движущихся по трещинам гидротерм. Таким образом, жильовидные образования с высокой концентрацией магнетита могут намагничиваться в полях двух различных магнитных источников: в главном геомагнитном поле, а также в антипараллельном к нему собственном магнитном поле метаморфизированных пород. При этом, поле «магнитных» жил, в случае интенсивного остаточного намагничивания, может даже превосходить внешнее поле, т.е. возможен эффект обратной полярности. В то время, когда была создана модель Берсудского, мировая практика знала лишь единичные случаи обратного намагничивания пород относительно геомагнитного поля. Возможно, что именно по схеме этой модели возникли не только сибирские аномалии, но и локальная геомагнитная аномалия Цкалцминда-Уреки [Кереселидзе и др., 2009].

Заключение. Локальная геомагнитная аномалия Цкалцминда-Уреки может оказаться уникальным геофизическим полигоном для проверки теории генезиса малых аномалий с резкими градиентами геомагнитного поля. Согласно предварительным результатам электромагнитной разведки эта территория может считаться также аномальной своими геоэлектрическими характеристиками, которые вероятно складываются вследствие совместного действия нескольких факторов: просачивания морской воды внутрь пористой прибрежной среды; эффекта электролитической поляризации при движении жидкой проводящей фракции по каналам между намагниченными породами; накопления свободных и связанных поляризационных зарядов и их релаксации через теллурические токи и электромагнитное излучение. Такие качества данной геомагнитной аномалии могут быть использованы для проверки модели собственных электромагнитных колебаний локального сегмента системы Литосферы-Атмосферы-Ионосферы, созданной для объяснения механизма генерации ОНЧ электромагнитного излучения в эпицентральной зоне будущих землетрясений.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Berishvili G., Tarkhnishvili A., Lominadze J., Mebaghishvili N., Tabaghua G., and Kartvelishvili K.: Some Results of Electrometric Survey of the Territory of Magnetic Sands of the Ureki Seaside Resort, Bull. of the Georgian National Academy of sciences, , 2008 vol. 2, n.3, 70-74.
2. Feund, F.T., Takeuchi, A., and Lau, B.W.S.: Electric currents streaming out of stressed igneous rock- A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions, Phys. Chem. Earth, , 2006, 31, 389-396.
3. Feund, F.T., Stress-activated positive hole charge carries in rocks and the generation of pre-earthquake signals, in Electromagnetic Phenomena Associated with earthquakes edited by M. Hayakawa, Research Signpost, New Dehli, 2009 pp. 41-96.
4. Kachakhidze M., Kereselidze Z., and Kachakhidze N.: The model of self-generated seismo-electromagnetic oscillations of the LAI system, Solid Earth 2011, 2, 17-23, doi:10.5194/se-2-17-211.
5. Kachakhidze M., Kereselidze Z., Kachakhidze N., Ramishvili G., and Kukhianidze V.: In connection with identification of VLF emissions before L'Aquila earthquake, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. ,2012 12, doi:10.5194/nhess-12-1009-2012.
6. Kereselidze Z., Kachakhidze M., Kachakhidze N., and Kirtshalia V.: Model of Geomagnetic Field Pulsations before Earthquakes Occuring, Nova Science Publishers, Georgian international Journal of Sciences and Technology, 2010, vol.2, 167-178.
7. Molchanov O.A., Mozhaeva O.A., Golyavin A.N., and Hayakawa M.: Observation by the Interkosmos-24 Satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes. Ann. Geophys., Atmos. Hydrospheres Spase Sci. , 1993, 11,5, 431-440.
8. Hayakawa M., and Molchanov O.A.: Seismo-Electromagnetics; Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. TERRAPUB, Tokyo, 2002, 1-477.
9. Yoshino T.: Low-Frequency Seismogenic Electromagnetic Emissions as Precursors to Earthquakes and Volcanic Eruptions in Japan, J. of Scientific Exploration, 1991, 5(1), 121-144.
10. Краев А.П.: Основы геоэлектрики, Часть 1, М.-Л. Гостехиздат, 1951, 1-445.
11. Кобранова В.Н.: Петрофизика, М. "Недра", 1986, 1-391.
12. Кереселидзе З.А., Одилавадзе Д.Т., Геладзе Г.Г., Садрадзе Н.Г., Тваури Г.А.: Модель локальной геомагнитной аномалии Цкалциминда-Уреки, Труды Института геофизики им. М. Нодиа, 2009, т.61, 113-120.
13. Логачев А.А.: Курс магниторазведки, М. Госгеолиздат, 1- 306, 1951.
14. Стеттон Дж. Теория электромагнетизма. М.-Л., ОГИЗ-Гостехиздат, 1948, 1-539.
15. Твалчрелидзе М.Т., Лебанидзе З.М., Джаошвили Г.Ш.: Условия формирования современных осадков центральной и юго-восточной части грузинского сектора Черного моря, Труды ГИН АН Грузии. Нов.сер. , 2002, Вып.117, 238-244.
16. Шимони К.: Теоретическая электротехника, 1964, М., Мир, 1-773.
17. Хведелидзе Н.С., Кереселидзе З.А., Беришвили Г.Г., Гиоргадзе М.Г.: Особенности локальной магнитной аномалии Цкалциминда-Уреки, Труды Ин-та геофизики , 2008 Т.60, 98-105.

Article received: 2012-05-13