

О ТЕЛЛУРИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ОНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ МАГНИТО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ ЦКАЛЦМИНДА-УРЕКИ

Кереселидзе З.А.

*Институт геофизики им. М.З. Нодиа, ТГУ
z_kereselidze@yahoo.com*

Введение

Интерес к узкой береговой полосе Черного моря между устьями рек Супса и Натанеби связан с наличием т.н. “магнитных” песков. Исторически считается, что такие пески обладают уникальными качествами, способствующими излечению людей, особенно детского возраста, имеющих проблемы, связанные с костно-двигательным аппаратом. Первые измерения геомагнитного поля в прибрежной зоне моря были проведены еще до второй мировой войны профессором М.З. Нодиа. Он дал первое описание “магнитных” песков, обозначаемых зоной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки, следуя названиям расположенных тут сел. Тогда же был организован лечебный комплекс “Магнетити”, который считается условным центром аномалии. Практически непрерывное исследование геомагнитного поля в зоне Цкалицминда-Уреки началось в последнем десятилетии прошлого столетия.

Результаты многолетних комплексных магнито-электromетрических измерений стали основой для построения электромагнитной модели данного места [1. Kereselidze, 2012]. В частности, данная модель допускает возможность генерации очень низкочастотного (ОНЧ) электромагнитного излучения из зоны аномалии. Такое явление может иметь место либо как результат глубинных процессов в области аномалии, либо как следствие действия некоторого внешнего фактора. В любом случае, можно допустить, что в определенных условиях аномальная зона, вызывающая возмущения, может генерировать электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве. Например, возможность существования такого эффекта в береговой полосе моря может оказаться полезной для подтверждения реальности физического основания модели собственных электромагнитных колебаний локального сегмента системы Литосфера-Атмосфера-Ионосфера [2. Kachakhidze et al., 2011; 3. Kachakhidze et al., 2012]. Однако, эту модель нельзя считать достаточно строгой с точки зрения ее достаточной обоснованности. Действительно, до настоящего времени является актуальной проблема неоднозначности механизма генерации ОНЧ электромагнитных волн, связанных с землетрясениями. Например, среди многочисленных исследований, касающихся экспериментальных аспектов этой проблемы, можно выделить работы [4. Hayakawa and Molchanov, 2002; 5. Akhoondzadeh et al., 2010], в которых рассматривается фактор ионосферы, как области генерации ОНЧ электромагнитного излучения. Однако, существует мнение, что вероятной причиной генерации данного электромагнитного индикатора землетрясений, может быть электро-пьезоэффект, действующий в глубине земли [6. Mognaschi, 2002].

В то же время, нельзя исключить также возможность действия электрокинетического механизма, альтернативного пьезоэффекту. Согласно этой теории, генерация электрических зарядов

в глубине Земли происходит из-за термодинамических преобразований в гипоцентре будущего землетрясения [7. Freund, 2009; 8. Surkov, Philipenko, 2015]. Однако, ОНЧ электромагнитное излучение в зоне магнитной аномалии, в частности, обсуждаемой нами, можно считать результатом действия другого механизма, возникающего из-за магнитогидродинамического (МГД) эффекта, а также т.н. явления электролитической гидратации, способствующих перманентной поляризации проводящей среды. Такое совместное действие реально может быть причиной проявления дисперсных качеств среды. Поэтому, неоднородной, с точки зрения электромагнитной структуры, среде вполне может существовать возможность для генерации достаточно сильных локальных теллурических токов и переменных электрических полей. Следовательно, такую среду вполне можно считать аномальной не только по ее магнитным, но и электрическим качествам.

Таким образом, представляется, очевидной актуальность вопроса исследования низкочастотного электромагнитного излучения в месте, подобном геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки. Отметим, что кроме ОНЧ волн, тут могут также существовать крайне низкочастотные электромагнитные волны (КНЧ) и локальные пульсации геомагнитного поля, связанные с движением моря в зоне магнитной аномалии. Поэтому, наряду с ОНЧ электромагнитным излучением, нельзя исключить локальное распространение возмущающего влияния также и этих волн на околоземную космическую среду. Например, из-за взаимодействия электромагнитных волн со слабо ионизированной ионосферной плазмой может усиливаться магнитная вязкость морской воды, что может существенно влиять на частотные характеристики магнитогидродинамических волн, генерированных в D-области ионосферы [9. Kereselidze et al., 2010].

Геологические характеристики зоны локальной магнитной аномалии Цкалцминда-Уреки и данные геоэлектрической разведки

В связи с генезисом локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки возникает вопрос: имеют ли общую основу геомагнитные и геоэлектрические аномалии, или они могут существовать отдельно друг от друга? Если геоэлектрические явления вызваны только теллурическими токами, то во многих местах Черноморского побережья Грузии, где также распространены «магнитные пески», должны существовать места, подобные аномалии Цкалцминда-Уреки. Однако, вопрос других электрических аномалий на черноморском побережье пока что следует считать открытым. Вероятно, если они и существуют, то, своими тонкими электромагнитными характеристиками, они могут быть отличными от аномалии Цкалцминда-Уреки, где магнитная и электрическая аномалии очевидно связаны с локальной геологической структурой. В связи этим представляется необходимым вспомнить о динамических изменениях, происшедших в бассейне Черного моря в недавнем, по геологическим временным масштабам, прошлом.

Установлено, что в позднем плейстоцене (18-17 тысяч лет до н.э.), на главной стадии последнего периода оледенения, уровень Черного моря (либо озера?) менялся в пределах 100÷110 м. от современной отметки. Во время максимальной регрессии уровня моря прибрежная полоса находилась на 2.5÷3.5 км. западнее современного берега, рельеф которого имел значительную крутизну. Затем, в среднем голоцене, когда уровень моря повысился до отметки +4.5 ÷ – 5 м, береговая линия проходила на 7÷8 км. восточнее современной линии. После этого последовали относительно малые изменения уровня моря (промежуточная регрессия, трансрегрессионная фаза нового Черного моря, фанагорийская 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 реками. В частности, в грузинском секторе черноморского побережья наиболее эффективной была система 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 этими реками действует подсистема более маловодных рек: Супса и Натанеби, питающая побережье в зоне Уреки-Цкалцминда.

Эта подсистема характеризуется некоторыми собственными признаками, хотя ее действие в основном не отличается от берегообразующего действия главной системы. Супса и Натанеби также приносят Базальты (характерное удельное электрическое сопротивление $\tilde{\rho} \sim 10^3$ Ом·м), Трахибазальты, Андезиты ($\tilde{\rho} \sim 5 \cdot 10^2 - 10^4$ Ом·м), Диабазы ($\tilde{\rho} \sim 6 \cdot 10^6$ Ом·м), Трахиты и Туфы, т.е. палеогенные вулканогены и вулканогенно-осадочные материалы, имеющие различное удельное электрическое сопротивление $\tilde{\rho}$. Вероятно, что в бассейнах этих малых рек, в условиях, относительно спокойных, чем в бассейнах крупных рек, происходила глубинная 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 в обсуждаемой береговой зоне, присутствует около 72÷97 % тяжелой фракции, в основном представленной магнетитом (32÷71%, $\tilde{\rho} \sim 10 - 10^5$ Ом·м) и Пироксеном (21÷38%, $\tilde{\rho} \sim 10^5 - 10^6$ Ом·м). Характерный диаметр зерен песка 0.16÷0.29 мм и содержание в нем Пирита, Эпидота, Биотита и Циркония является незначительным.

Однако, 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 (удельное электрическое сопротивление $\tilde{\rho} \sim 5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^3$ Ом·м) отложениях и имеет особые 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 новоэвксинской регрессией, но такое предположение требует дополнительное детальное исследование этого места [10. Твалчрелидзе и др., 2002].

В 2006-2007 гг. была исследована прибрежная часть геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки и примыкающие к ней территории с целью определения глубинной литологической дифференциации и мощности распространённых материалов. Геофизическое изыскание было проведено методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Этот метод оказался достаточно эффективным, т.к. топография исследованной территории довольно простая т.к. разность гипсометрических уровней на четырехкилометровом участке вдоль берега моря составляет всего 8 м. По полевым данным были построены трёхслойные кривые ВЭЗ (Q, H и K типов). Например, вдоль профиля длиной 4 км, следующего параллельно береговой линии, был получен разрез кажущегося сопротивления, а также модельный геоэлектрический разрез, достигающий до глубины 90 м [11. Кереселидзе и др., 2009]. В частности, по кривым типа Q мощность первого слоя достаточно большая. Оконтурирование этого слоя в одномерном представлении по-

казывает, что тут залегает геологическое тело с высоким удельным электрическим сопротивлением: $\tilde{\rho} \sim 1000 \div 2000$ Ом·м. Характерные пространственные размеры этого тела: длина ~ 2500 м, ширина ~ 240 м, толщина ~ 2 м. Вероятной причиной существования такого тела является река Супса, к палео пойме которой вероятно принадлежит центральный фрагмент геомагнитной аномалии. Также был получен перпендикулярный морскому берегу разрез длиной ~ 280 м, имеющий глубину ~ 24 м. Этот разрез соответствует поперечному сечению в пределах центрального фрагмента магнитной аномалии. Эти разрезы показывают, что дифференциация глубинной среды магнитной аномалии по удельному электрическому сопротивлению является достаточно контрастной. Поэтому, резонно допустить, что аномальное геомагнитное поле способно порождать такое же аномальное геоэлектрическое поле, т.е. данное место можно считать аномальным не только по геомагнитным, но также и по геоэлектрическим параметрам,

Механизм электрической поляризации в условиях геомагнитной аномалии “Магнетити”

Центральный участок локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки характеризуется достаточно крутыми градиентами магнитного поля (100 нТ/10м), что является достаточным условием для генерации теллурических токов [12. Trenkin, 2015]. Тут характерное геомагнитное поле значительно отличается от средней абсолютной величины геомагнитного поля: $T \approx 49000$ нТ, полученной по данным Душетской геофизической обсерватории ($N = 42^{\circ}05'41''$, $E = 44^{\circ}42'11''$) в 2010-2011 гг. Указанное расхождение на территории геомагнитной аномалии меняется в пределах: $\Delta T \approx \pm 3000$ нТ [1. Кереселидзе, 2012]. Геоэлектрическая разведка показала, что глубинная структура локальной геомагнитной аномалии весьма неоднородна. Осложнения, возникающие при измерениях, вероятно указывают, что находящиеся в глубине породы одновременно могут проявлять качества как электрических проводников, так и диэлектриков. Вероятно, что частоту изменения локального геоэлектрического поля могут задавать замыкающиеся тут теллурические токи. Кроме этого, в пористой, насыщенной морской водой среде, из-за разложения минеральных примесей особенно активно должен проявляться фактор ионизации [13. Кобранова, 1986], который может активно влиять на интенсивность теллурических токов. Переменное электрическое поле, связанное с токами, можно считать внешним по отношению к породам, образующим морской берег. Это поле может существенно менять электрические качества среды, в которой может происходить макро поляризация и электрокинетические процессы, т.е. накопление зарядов. Характер процесса перераспределения заряда будет зависеть от электрической проводимости среды. Известно, что скорость перераспределения избыточного заряда связана со временем его релаксации, которая зависит от степени неоднородности среды. С ней связаны энергетические потери, вызванные джоулевым тепловыделением, а также потери на электромагнитное излучение, интенсивность которого прямо зависит от скорости накопления свободных и связанных поляризационных зарядов. Теллурические токи также могут генерировать электромагнитное излучение. Таким образом, в зоне геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки, под воздействием переменного электрического поля, вполне могут реализоваться условия, необходимые для генерации электромагнитных волн.

Касаясь проблемы электромагнитного излучения в прибрежной зоне, следует 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. Однако, такая качественная характеристика не является достаточной для полноценного объяснения причины особых электромагнитных эффектов, которые могут иметь место в зоне магнитной аномалии. Например, допустим, что в какой-то ее части, состоящей из различных пород, возникнут токи смещения. Предположим, что их плотность

мала по сравнению с плотностью тока проводимости. Тогда такую породу следует считать неидеальным проводником. В противном случае, когда плотность тока проводимости мала по сравнению с плотностью токов смещения, зависящих от связанных поляризационных зарядов, порода является несовершенным изолятором, т.е. диэлектриком. Следовательно, в зоне магнитной аномалии электрическая проводимость и частота изменения электрического поля определяют, следует ли рассматривать конкретную породу в качестве диэлектрика или же проводника. Известно, что критерием для такого деления является параметр $\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}$, где ε – диэлектри-

ческая 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, а при высоких частотах – 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 [14. Шомони, 1964]. Очевидно, что сама МГД среда может являться генератором электрического поля в пределах геомагнитной аномалии, интенсивность которого будет зависеть от изменения электрических качеств среды. Тут, в частности, наряду со слабо проводящими песками, а также слабоцементированными песчаниками и известняками, также присутствует хороший проводник, магнетит. 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, который равен вектору поляризации \mathbf{P} единицы объема породы.

Причины, вызывающие электрическую поляризацию пород, создающих геомагнитную аномалию, могут быть самими разнообразными. Например, тут присутствуют т.н. ионно-проводящие породы, вроде песков, составляющих основу пляжа. В этих породах, если они находятся под воздействием внешнего электрического поля, возможны как упругие смещения внутри атомов и молекул, так и эффекты 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 суммарную поляризацию. Однако, нельзя исключить влияние электролитических процессов, возможно весьма интенсивных из-за пористости песков, т.е. миграции морской воды вглубь породы [13. Кобранова, 1986]. Также, необходимо отметить, что различные типы поляризации должны иметь различные характерные времена смещения носителей зарядов, а также скорости релаксации их неоднородности. Поэтому, эти характерные времена меняются в широком диапазоне, от долей микросекунд до часа и более. 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 [13. Кобранова, 1986]. Поэтому, даже на фоне интенсивных теллурических токов, геомагнитные аномалии могут иметь достаточно медленно меняющиеся электрические характеристики. Следовательно, геомагнитные аномалии сами по себе вряд ли могут быть причиной генерации высокочастотных геоэлектрических полей. Однако такое утверждение может оказаться некорректным в некоторых случаях. Например, нельзя исключить влияние на магнитную аномалию глобальных геомагнитных возмущений. Геомагнитные бури часто могут сопровождаться магнитосферными ОНЧ и КНЧ электромагнитным излучением, которые могут возмущать земное электромаг-

нитное поле и менять его частотные характеристики. Поэтому, в определенных условиях, может возникнуть эффект переизлучения электромагнитных волн. Появление в зоне магнитной аномалии переменного электрического поля может быть также связано с таким локальным фактором, как просачивание морской воды сквозь пористую намагниченную прибрежную среду. Это явление способно порождать теллурические токи, подобно МГД эффекту, приводящему к генерации токов Холла из-за движения проводящей жидкости во внешнем магнитном поле. Но просачивание хорошо проводящей морской воды сквозь пористые породы может также привести к миграционной, т.е. объемной поляризации. Она особенно значительной может оказаться в среде, 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, способствующий развитию электрокинетического эффекта, тормозящего заряженные частицы. В результате торможения может возникнуть переменный электрический дипольный момент, являющийся источником генерации электромагнитного излучения. Такой процесс, имеющий кинетическую сущность, физически подобен механизму, предложенному Фреундом для объяснения ОНЧ электромагнитного излучения из эпицентральной зоны будущего землетрясения [7. Freund et al., 2009]. Однако, электрокинетические механизмы поляризации в твердой породе могут развиваться и в случае отсутствия внешнего электрического поля. Но некоторые другие типы поляризации, например: концентрационно-диффузионный, электролитический или же электроосмотический (перенос электролита через породу из-за градиента электрического поля) без приложения значительной разности электрических потенциалов без внешнего поля исключаются.

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 - со 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 измене-

ния 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

$$\mathbf{P} = n_0 \alpha \mathbf{E}_{cp}, \quad (1)$$

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.

Дипольная модель магнитно-электрической аномалии.

Низкочастотное электромагнитное излучение от поверхности магнитно-электрической аномалии, достигающее ионосферных высот, из-за действия механизма передачи энергии волна-частица, может способствовать возникновению неоднородных образований в слабо ионизированной плазменной среде. Такие спонтанные неоднородные структуры могут иметь магнитную вязкость, которая способствует генерации низкочастотных магнитогидродинамических (МГД) волн [9. Kereselidze et al., 2010]. Кроме этого, существование постоянных или спорадически возникающих заряженных слоев на уровнях нижних (E, D) слоев ионосферы, может способствовать отражению земного электромагнитного излучения. В таком случае в пространстве между магнитно-электрической аномалией и ионосферой возникнет некоторое подобие пространственного конденсатора, эквивалентом которого будет плоский электромагнитный контур. В пределах этого участка пространства существует вероятность генерации стоячих электромагнитных волн, поддерживаемых излучением, исходящим от земной поверхности.

В случае резонансного усиления эти волны способны существовать достаточно долго, даже при условии их малой начальной интенсивности. В результате, стоячие волны могут возмущать крупномасштабное атмосферное электрическое поле, которое способно влиять на локальные метеорологические условия. Например, модуляция вертикального атмосферного электрического поля частотой стоячих волн может привести к собственным гидромеханическим колебаниям водяных капель, содержащихся в облаках. В таком случае может возникнуть дополнительный источник атмосферного электромагнитного излучения, имеющий резонансную природу. В дополнение к электрическим эффектам, возможным в атмосфере и в нижней ионосфере, нельзя исключить также вероятность активизации дрейфового механизма, способного генерировать возмущения тотальной электронной концентрации (ТЕС) не только в нижних, но и в верхних (F1,2) слоях ионосферы [15. Namgaladze et al., 2009].

Известно, что мощность электромагнитного излучения определяют мультипольные моменты излучающего объекта. Представим аномалию, как область некоторой системы электрических зарядов, внутри которой замыкаются контуры которой замыкаются теллурических токов. Такая модель вполне согласуется с структурной картиной аномалии, в достаточной степени определенной путем магнитно-электрической разведки. Эта картина, кроме качественной наглядности, представляется достаточно удобной также и с точки зрения оценки интенсивности возможного электромагнитного излучения на достаточном удалении от области аномалии. Например, на уровне ионосферы мощность электромагнитного излучения, следовательно, омические потери модельной системы зарядов, аппроксимирующей магнитно-электрическую аномалию, в первую очередь определяют дипольные электрические и магнитные моменты системы [16. Стреттон, 1948]. Если потребовать, что магнитное поле квазистационарного теллурического тока подчинялось законам стационарного поля, следует допустить, что контур тока замыкается в области системы электрических зарядов. Такое требование представляется также достаточно справедливым в случае очага будущего землетрясения. В случае такого допущения оценка энергетического эффекта электромагнитного излучения особенно упрощается в удалении от системы. В таком случае мощность излучения системы зарядов, моделирующих магнитно-электрическую аномалию, на уровнях нижней ионосферы будут в основном определять ее электрические и магнитные дипольные моменты

$$P^e = \int_V R' \rho_0 dV , \quad (2)$$

$$P^m = \frac{1}{2} \int_V [R', J_0] dV , \quad (3)$$

где $R' \ll R$. R' – координата меняется в пределах линейного масштаба системы зарядов, R – расстояние от системы до точки наблюдения, ρ_0 – плотность поляризационных зарядов, J_0 – электрический ток, который обеспечивают свободные заряды.

Вклад дипольных моментов в суммарный энергетический эффект в удалении от аномалии должен зависеть от частоты и длины волны электромагнитного излучения. В частности, в высокочастотном приближении мощность электромагнитного излучения квазинейтральной системы зарядов в основном определяется электрическим дипольным моментом P^e

$$W^e = \frac{\omega^4}{12\pi} \mu \sqrt{\varepsilon\mu} |P^e|^2, \quad (4)$$

где ω – частота электромагнитного излучения, ε и μ – диэлектрическая и магнитная постоянные среды.

Для того, чтобы воспользоваться формулой (4) следует определить величину электрического диполя, эквивалентного аномалии “Магнетити”. Данная задача является достаточно сложной, т.к. ее решение зависит от многих параметров: плотности поляризационных зарядов, электрической проводимости среды и линейных размеров аномалии. Однако, существует обстоятельство, которое позволяет упростить задачу. В частности, согласно нашей модели, в области геоэлектрической аномалии существуют физические условия, позволяющие передачу теллурического тока, например, в случае его генерации в гипоцентре землетрясения, находящегося в достаточной близости от аномалии. Соответственно, может образоваться локальный элемент теллурического тока или его полный контур, охватывающий, например, морскую среду и некоторую часть суши в пределах аномалии. При этом, исходя из структуры и размеров аномалии, является возможным существенное возрастание вклада теллурического тока, по сравнению с вкладом поляризационных зарядов, в омические потери системы. В таком случае интенсивность электромагнитного излучения должна преимущественно зависеть не от частоты, но от волнового числа k , связанного с поперечным размером системы зарядов l [16. Стреттон, 1948]

$$W^m = \frac{k^4}{12\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} |P^m|^{(2)}. \quad (5)$$

Оценка интенсивности электромагнитного излучения в зоне магнито-электрической аномалии Цкацминда-Уреки

Выше было отмечено, что обсуждаемая аномалия в значительном количестве содержит магнетит. Поэтому, согласно косвенной оценке, в области аномалии является возможным возрастание в пределах не менее одного порядка, по сравнению с вакуумом, корня соотношения характерных электромагнитных постоянных среды $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} 10^3 = 3800$ Ом. Определение величины магнитного момента PP^m , размерность которого = $A \cdot m^2$, также является достаточно сложной задачей. Однако, возможно упрощение, если аппроксимирующий магнитную аномалию диполь, подобно электрическому дипольному моменту, представить в виде суммы элементарных диполей. Для этого достаточно виртуально представить, что контур теллурического тока в области геомагнитной аномалии является токовой катушкой, радиус r_0 отдельных мотков которой значительно меньше по сравнению с поперечным размером аномалии. Магнитный момент отдельного витка: $m = \pi r_0^2 I_0$, где I_0 – амплитуда периодически меняющегося теллурического тока, равная его плотности, если площадь поперечного сечения витка $S = \pi m^2$. Следовательно, выражение (3) для мощности излучения в случае одного витка упрощается где Ω – электрическое сопротивление в Ом. Таким образом, имеем следующую формулу для оценки мощности электромагнитного излучения отдельного витка токовой катушки

$$W^m = 5000\pi^6(r_0/l)^4 I_0^2, \quad (6)$$

которая также может быть представлена в классическом виде: $W = 0.5\Omega I_0^2$ [16. Стреттон, 1948].

Для оценки суммарной мощности электромагнитного излучения элементарных магнитных диполей: $Q = \sum W^m$ можно воспользоваться геофизическими параметрами аномалии Цкалцминда-Уреки. В частности, согласно данным электрометрии, тут теллурический ток может достигать величины $I_0 \approx 0.01 \text{ A}$ [11. Кереселидзе и др., 2009], что значительно превосходит типичные величины силы теллурических токов в обычных условиях. Также известно, что характерное соотношение поперечного и продольного линейных размеров центральной части аномалии в цилиндрическом приближении: $r_0/l \approx 0.3$. Следовательно, мощность электромагнитного излучения отдельного витка виртуальной токовой катушки $W^m = (4 \cdot 10^4) \text{ Ом} \cdot (10^{-4}) \text{ A}^2 \approx 4 \text{ Вт}$. Следующим шагом, необходимым для оценки вероятной мощности суммарного электромагнитного излучения из области магнито-электрической аномалии является определение числа витков виртуальной катушки, необходимого для локального воздействия на ионосферу.

Известно, что в случае верхнего слоя (F_1) достаточно иметь генератор электромагнитного излучения с номинальной мощностью 750 Вт, диапазон электромагнитного излучения которого включает частоты 4.5-9 МГц. [17. Лихтер и др., 1988]. Однако, в нижних слоях (D, E), где плотность космической плазмы заведомо выше, чем в верхнем слое, для воздействия на ионосферу, в зависимости от широты и вариации ее параметров, необходима мощность излучения не менее 25-100 кВт. Можно допустить, что обсуждаемая нами виртуальная токовая катушка является антенной с вертикально направленным электромагнитным излучением. Ее мощность будет определять длина модельной катушки L , или число витков N . Допустим, что $L = 15 \text{ км}$, т.е. $N = 7.5 \cdot 10^3$. Следовательно: $Q = 30 \text{ кВт}$. Такая мощность направленного электромагнитного излучения реально способна оказать локальное возмущающее воздействие на нижнюю ионосферу. Отметим, что для радио антенн, покрывающих пространство в пределах определенного телесного угла, по сравнению с направленными антеннами, характерным является коэффициент усиления мощности излучения: $G = 100$ [18. Гуревич, 2007]. Следовательно, для пространственного эффекта из зоны аномалии, следуя модели токовой катушки, мощность электромагнитного излучения должна возрасти до $Q \approx 3 \text{ мВт}$, что представляется возможным лишь в случае резкого возрастания теллурических токов. Однако такой эффект сложно представить результатом естественного физического процесса. Следовательно, можно предположить только возможность локального возмущения ионосферы, притом лишь при строго вертикальном характере распространения электромагнитного излучения, что является вполне осуществимым из-за плоской поверхности магнито-электрической аномалии.

Модель собственных электромагнитных колебаний сегмента системы ЛАИ

Основной причиной для возникновения электрокинетического эффекта в земной глубине является вулканизм. Поэтому генерацию теллурических токов, фиксируемых в области сейсмической активности, можно считать результатом термодинамических превращений среды, т.е. выделения тепла. Очевидно, что для излучения электромагнитных волн с земной поверхности необходимо неоднородное распределение заряда, т.е. существование электрического тока. Считается, что в системе литосфера-атмосфера первая среда является проводником, вторая – диэлектриком. Это означает, что если не происходит разрыва атмосферы, то ее взаимодействие с литосферой может быть только индуктивным. Однако, в случае разрыва, в атмосфере должны возникнуть кратковременные токовые разряды, сопровождающиеся излучением электромагнитных волн. Обычно, частота электромагнитного излучения связана с определенным линейным параметром. Например, в случае разрыва конденсатора это расстояние между заряженными плоскостями. Аналогично, часто причиной разрыва атмосферы является экстремальное увеличение плотности заряда на земной поверхности, либо в облаках, когда напряжение между ними

превосходит порог разрыва воздуха. В этом процессе участие ионосферы может ограничиваться индукционным отголоском на литосферно-атмосферный разряд. Такое может произойти, например, в случае накопления заряда в местах со сложной орографией, где земная поверхность может иметь неоднородную кривизну [19. Helman, 2013].

В случае морского дна, в отличие от суши, на первый взгляд представляется, что теллурический ток, генерированный в морской глубине, не может вызывать индукционный эффект в атмосфере, т.к. неоднородность заряда на поверхности морского дна мгновенно будет нивелирована свободными зарядами воды. Отсюда следует, что в морской среде могут генерироваться лишь кратковременные токовые импульсы, контуры которых должны иметь по возможности малый линейный размер, т.е. они будут моментально закорачиваться. Однако, такой вывод можно считать корректным только в удалении от береговой линии моря. В качестве примера можно привести работу [20. Мороз, Самойлова, 2017], в которой рассматривалась роль берегового эффекта в вопросе интерпретации в прибрежных зонах дальневосточного региона. Из ранних исследований, проведенных в этом регионе, было известно, что орографический эффект морского дна порождает сильные аномалии электромагнитного поля, которые искажают информацию о глубинной электропроводности. Считался, что этот эффект связан с контрастным изменением электропроводности двух контактирующих сред: электрически хорошо проводящей морской воды и относительно высокоомной среды морского побережья, имеющей сложную орографию.

В качестве характерных величин при численном моделировании были использованы характерное удельное электрическое сопротивление морской воды: $\tilde{\rho} \approx 0.25$ Ом·м и чехла осадочно-вулканических пород $\tilde{\rho} \approx 30$ Ом·м. По тепловому потоку в зоне генерации теллурических токов в морской среде: $q \approx 60$ мкВт/м² можно оценить были использованы характерную плотность этих токов: $j_0 \approx 3 \cdot 10^{-7}$ А/м². Считаем, что является вполне допустимым воспользоваться указанной работой для подкрепления нашей гипотезы относительно электромагнитных эффектов в зоне аномалии Цкалцинда-Уреки. В первую очередь отметим, что электрическую проводимость Черного моря, в следствие ее более высокой солености по сравнению с океаном, должна быть немного большей. Поэтому, также более высокой может оказаться плотность теллурических токов. Далее, омическое сопротивление и мозаичность его картины, которая физически полностью эквивалентна орографическому эффекту, в зоне магнито-электрической аномалии существенно превосходят эти же параметры дальневосточной зоны. Что же касается характерного интервала периодических изменений интенсивности теллурических токов: для зоны Камчатки он составлял: $T_0 = (100-1000)$. Для сравнения, характерные времена поляризационных процессов в зоне аномалии могут протекать в заведомо более малых временных масштабах.

В отличие от моря, линейные размеры контуров теллурических токов на суше могут быть совершенно разными по причине изменчивости электрической проводимости земных пород. Очевидно, что эти токи могут быть причиной импульсного излучения электромагнитных волн. Однако, электромагнитное излучение от земной поверхности может происходить и по другой схеме, в которой нет необходимости для явного включения эффекта теллурических токов. В частности, в работах [2. Kachakhidze et al, 2011; 3. Kachakhidze et al, 2012] была представлена достаточно простая квази-электростатическая модель, согласно которой локальное ОНЧ (очень низко частотное) электромагнитное излучение, часто фиксируемое в процессе подготовки землетрясения, может являться проявлением собственных электромагнитных колебаний отдельного сегмента системы Литосфера-Атмосфера-Ионосфера (ЛАИ). Эта модель основана на идее, согласно которой поляризационный заряд генерируется в процессе хаотического возникновения микротрещин и их последующего объединения в направленный магистральный разлом, возникающий гипоцентральной области будущего землетрясения. Следуя модели, ОНЧ электромагнитное излучение в характерном диапазоне частот (1кГц-1МГц) на последней стадии под-

готовки землетрясения может быть связано с магистральным разломом, в пределах длины которого которых должна меняться полярность Земли и будет иметь место индукционное воздействие на нижнюю ионосферу. Этот эффект лежит в основе гипотезы о колебательном электромагнитном контуре сегмента системы ЛАИ. Данная гипотеза достаточно наглядно объясняет эффект изменения спектра ОНЧ электромагнитного излучения в процессе подготовки землетрясения, заключающийся в последовательном уменьшении основной частоты электромагнитных волн. Математическое отображение физической сути этой модели дается следующей зависимостью

$$\omega = \beta \frac{c}{l}, \quad (7)$$

где ω – основная частота колебательного электромагнитного контура, c – скорость света, l – длина разлома, $\beta \leq 1$ – коэффициент неоднородности среды. Очевидно, что случай $\beta = 1$ должен считаться идеальным. При строгом суждении следует принять во внимание два фактора, существование которых является реальным для любого землетрясения: 1. неоднородность земных пород; 2. погрешность линейного параметра l . Поэтому, является очевидным, что интервал изменения коэффициента β следует определять эмпирически, т.е. на основе обобщения статистических данных.

Согласно модели собственных колебаний электромагнитного контура сегмента системы ЛАИ, локальная инверсия атмосферного электрического поля является необходимым условием для образования контура и генерации ОНЧ электромагнитного излучения. Именно явление локальной инверсии выделяет некоторый сегмент из глобального электромагнитного контура системы ЛАИ, собственные колебания которого, имеющие частоту $f \approx 7$ Гц, известны под названием шумановского резонанса. Его существование определяется неоднородностью распределения глобального атмосферного заряда, которая является источником крупномасштабной инверсии вертикальной компоненты атмосферного электрического поля. Фактически аналогично может происходить также мелкомасштабная инверсия электрического поля в результате изменения полярности некоторого системы ЛАИ. Наиболее вероятной причиной этого эффекта является интенсификация локальных теллурических токов, возможно связанных, например, с возникновением нового, или же с интенсификацией давно действующего земного термоионизированного канала. Существует гипотеза, что активизация подобного источника генерации глубинных зарядов происходит из-за локального повышения уровня сейсмической активности, в особенности, на последней стадии подготовки землетрясений.

Считается, что в зависимости от того, где находится гипоцентральная зона будущего землетрясения, электромагнитное излучение может иметь различный характер. Например, в морской среде, кроме ОНЧ диапазона, могут генерироваться также крайне низкочастотные (КНЧ) электромагнитные волны, имеющие диапазон геомагнитных пульсаций [9. Kereselidze et al, 2010]. В случае достаточной глубины, слой воды будет поглощать ОНЧ излучение, но будет пропускать электромагнитные волны КНЧ диапазона. Однако, если контур теллурического тока будет охватывать мелководье или участок берега, то может проявиться весь спектр электромагнитного излучения. В таком случае, в процессе подготовки землетрясения, локальная вертикальная картина электрического поля от земной поверхности до нижней границы ионосферы может существенно изменяться. Отображением этого явления, кроме электромагнитного излучения, могут служить аномалии изменения концентрации электронов в нижней ионосфере (ТЭК), особенно часто наблюдаемые в прибрежных зонах морских акваторий. Результатом этого явления может являться изменение магнитной вязкости плазменной среды, что является причиной т.н. эффекта аномального «нагрева» ионосферы [21. Акасофу, Чепмен, 1975]. В последние десятилетия это явление рассматривается как одно из наиболее чувствительных индикаторов процесса подготовки землетрясений. Поэтому, естественным представляется вопрос,

который касается любого вероятного источника генезиса ТЭК аномалии: могут ли теллурические токи иметь энергию, достаточную для образования аномалии в нижней ионосфере?

Допустим, что в процессе подготовки землетрясения области гипоцентра возник термоионизационный канал. Результатом действия этого источника генерации электрических зарядов будут теллурические токи, действие которых может оказаться особенно эффективным в особых, по своим электромагнитным характеристикам, местах, подобным аномалии Цкалцминда-Уреки. На примере этой аномалии нельзя исключить, что теллурический ток, генерированный в гипоцентральной зоне будущего землетрясения в глубине моря, может достигать берега. Для этого будет достаточным, например, контакт магистрального разлома с берегом, либо индукционное взаимодействие с берегом через ранее существующие разломы вблизи побережья. Такая связь будет способствовать интенсификации поляризованного процесса на участке с аномальными геофизическими характеристиками. Это может практически перманентно происходить в особенно неоднородных, с точки зрения электрической проводимости, местах, а также там, где достаточно сильно проявляется МГД эффект. Но для этого нужна соответствующая литологическая основа, порождающая геомагнитную аномалию с значительными градиентами магнитного поля. Аргументом в пользу такого предположения может являться информация об ОНЧ электромагнитного излучения в период серии землетрясений, происшедших в одном районе акватории Черного моря вблизи побережья Грузии, во второй половине декабря 2012 г. Данный “рой” землетрясений состоял из совокупности нескольких средних по силе землетрясений, с условным центром в точке: N 42.40°, E 41.00°.

Интенсивность магнитуд этих землетрясений, по местным и международным оценкам, менялась в пределах $M=4.1-5.7$. В этом районе моря находится достаточно густая сеть старых разломов, среди которых для подтверждения нашей гипотезы наиболее подходящими являются разломы, которые направлены в сторону устья реки Супса: N 42.018°, E 41.754° и общего устья Натанеби и Чолоки: N 41.911°, E 41.769°. Однако расстояние между этими точками $l \approx 12$ км нельзя считать реальным характерным линейным размером магнитной аномалии, так как по данным измерений она продолжается приблизительно на два километра до местечка Григолетти к северу от реки Супса (N 42.031°, E 41.741°). Очевидно, также следует сдвинуть южную границу аномалии от устья Натанеби примерно на такое же расстояние. Следовательно, после такой корректировки характерный линейный размер магнитной аномалии $l_0 \approx 16$ км. Именно эта часть прибрежной полосы, по нашему предположению, может считаться областью индуктивных теллурических токов, генератором которых вероятно могли быть сейсмические процессы в море. Согласно эмпирической формуле Уломова, справедливой для землетрясений с магнитудой $M \leq 6.7$ [22. Уломов, 1974]

$$lgl = 0.24 * M - 0.16, \quad (8)$$

разлому длиной $l_0 \approx 16$ км из выражения (8) соответствует землетрясение с магнитудой $M \approx 5.7$. Именно такой по величине являлась магнитуда самого сильного землетрясения в “рое” землетрясений, происшедшее 12.23.2012г. в 13:31ч. Теоретически, в случае однородной среды коэффициент неоднородности, входящий в формулу (7), $\beta = 1$. Такое идеальное приближение является достаточно справедливым для большинства землетрясений умеренной силы, сейсмический эффект которых является достаточно ощутимым на малых расстояниях от эпицентра события. Однако, в случае “роя” черноморских землетрясений может существовать очевидная неоднозначность, связанная с длиной параметра l , являющегося определителем собственной частоты колебаний электромагнитного контура локального сегмента системы ЛАИ. В этом случае в качестве характерного линейного параметра может служить, например, длина одного из существующих в морской среде глубинных разломов, расходящихся подобно ветвей от магистрального разлома длиной более 70 км. Начало этого разлома фактически примыкает к условному

центру эпицентральной области “роя” землетрясений. При этом он оканчивается практически в центре магнито-электрической аномалии. Поэтому, нельзя исключить, что характерная длина может быть равной любому из линейных масштабов геомагнитной аномалии l_0 . Наиболее вероятно таким масштабом является длина аномалии, которая, согласно измерениям, на суше более чем на порядок превышает ее ширину. Следовательно, согласно формуле (7), собственная частота электромагнитного контура будет значительно меньшей для длины, чем для ширины аномалии. Отметим, что определение самой низкой (основной) частоты является важным в любой задаче моделирования спектра частот собственных колебаний любого, механического или электромагнитного типа.

В случае обсуждаемой аномалии частота основная частота ОНЧ электромагнитного излучения может соответствовать максимально возможной длине замкнутой цепи индуцированных теллурических токов в зоне аномалии. Как было показано в работе [23. Kvavadze, Kereselidze, 2019], некоторую ясность в этом вопросе могут внести данные ионосферной станции Табахмела (N 41.655°, E 44.754°), находящейся в достаточной близости (расстояние ≈ 250 км.) от аномалии Цкалцминда-Уреки. Записи, произведенные в период от 13-27 декабря 2012 г, т.е. во время существования “роя” черноморских землетрясений, показали повышение уровня интенсивности ионосферного ОНЧ электромагнитного шума в канале $f = 18$ кГц. Подобный эффект не наблюдался в других каналах, действующих в достаточно близких от указанного канала дискретных полосах частот. Шум в этих каналах оставался на характерных среднестатистических уровнях. Оказалось, что в период наиболее сильных (по локальному каталогу) землетрясений “роя”, имевших магнитуды: $M = 5.7$ (12.23; 13.31) и $M = 5.4$ (12.25; 22.44), канал 18 кГц существенно “перекрывал” по мощности шума (более чем на 10 Децибел) все остальные каналы. Следует отметить, что возрастание шума в узкой оконной полосе канала 18 кГц не было связано с возмущениями геомагнитного поля, которые были характерными для спокойных магнитосферных условий. Следовательно, причиной увеличения шума в канале 18 кГц было действие какого-то локального фактора. Была высказана гипотеза, что таким фактором в период указанной серии черноморских землетрясений могла быть генерация в гипоцентральной области теллурических токов, цепи которых захватывали зону аномалии Цкалцминда-Уреки, находящуюся в близости от гипоцентральной области “роя”. Для подтверждения данного соображения обратимся к формуле (7), согласно которой частоте 18 кГц, при $\beta = 1$, соответствует длина: $l = 16.7$ км. Как оказалось, подобный продольный линейный масштаб имеет магнито-электрическая аномалия Цкалцминда-Уреки. Этот факт вряд ли можно считать случайным. Поэтому, нельзя исключить, что имеет место либо простое совпадение характерного линейного размера аномалии с длиной какой-то ветви морского магистрального разлома, существующего в этом месте, либо, что более вероятно, по нашему мнению, имел место индуктивный отклик магнито-электрической аномалии на сейсмические процессы, происходящие в глубине моря. В последнем случае аномалия Цкалцминда-Уреки действовала как генератор ОНЧ электромагнитное излучения определенного диапазона частот, соответствующего ее продольному линейному размеру: $l_0 \approx 16$ км. [23. Kvavadze, Kereselidze, 2019].

Заключение

Предполагается, что, в сейсмически активных местах морской акватории, посредством магистрального геологического разлома доходящего до берега, или связанной с ним сети разломов, может возникнуть индукционная электромагнитная связь, осуществляемая теллурическими токами. Согласно нашей модели, дополнительным условием, способствующим развитию данного эффекта, могут служить особенные магнито-электрические качества среды. В частности, именно таким местом является геофизическая (магнито-электрическая) аномалия Цкалцминда-Уреки, занимающая прибрежную полосу между реками Натанеби и Супса. Теллурические токи,

осуществляющие индукционную связь между морем и берегом, могут генерироваться в результате развития электрокинетического эффекта, возникающего в очаге будущего землетрясения и, вероятно также в области геофизической аномалии, где существуют необходимые условия для генерации свободных и связанных поляризационных электрических зарядов. Действительно, согласно данным многолетних комплексных исследований, аномальная зона представляет собой структуру с особыми магнито-электрическими качествами, способствующими возникновению суммарного эффекта, физически подобному эффекту макроскопической системы зарядов, обладающей мультипольными магнитными и электрическими моментами. В частности, такое модельное подобие позволяет допустить, что зона аномалии может служить генератором ОНЧ электромагнитного излучения, действующего по схеме, аналогичной, лежащей в основе модели собственных электромагнитных колебаний сегмента системы ЛАИ (Литосфера-Атмосфера-Ионосфера).

В качестве примера, подтверждающего возможность индукционной связи, был проведен анализ события, связанных с “роем” землетрясений, имевших место в декабре 2012 г. Гипоцентральная область данной серии землетрясений располагалась в морской акватории, достаточно близко от зоны аномалии Цкалцминда-Уреки. Существуют данные, подтверждающие, что во время этих землетрясений, некоторые из которых были достаточно сильными, происходила генерация ОНЧ электромагнитного излучения, способного влиять на параметры нижней ионосферы. Такое возмущающее воздействие на околоземную космическую плазменную среду было зафиксировано на ионосферной станции Табахмела, находящейся достаточно близко от черноморского побережья.

Следуя модели электромагнитного контура сегмента системы ЛАИ, во время этих событий диапазон низкочастотного электромагнитного излучения вероятно определялся продольным линейным размером аномалии Цкалцминда-Уреки, но не длиной какого-нибудь из существующих морских разломов. Это означает, что усиление ОНЧ электромагнитного шума в канале частот 18 кГц, имевшее место на ионосферной станции Табахмела, возможно являлось индукционным отголоском аномалии на сейсмический процесс, протекающий в морской среде недалеко от берега. Следовательно, магнито-электрическая аномалия могла служить в качестве достаточно мощной передаточной антенны, излучающей вертикальный пучок низкочастотных электромагнитных волн. Поэтому, к ряду различных индикаторов, указывающих на возрастание сейсмической активности и подготовку землетрясения, локальные возмущения ионосферы, вероятно можно причислить также локальное низкочастотное электромагнитное излучение, исходящее из мест с аномальными магнито-электрическими характеристиками.

ლიტერატურა – References – Литература

1. Кереселидзе З.А. Локальная геомагнитная аномалия Цкалцминда-Уреки, как возможный источник ОНЧ электромагнитных волн. *GESJ: Physics*, 1(7), 2012, с. 34-48. <http://gesj.internetacademy.org.ge/download.php?id=1945.pdf>.
2. Kereselidze Z.A., Kachakhidze N. K., Kachakhidze M. K. The Model of own Seismo-electromagnetic Oscillations of LAI System. *Solid Earth*, 2, 2011. www.solid-earth.net/2/1/2011/ doi:10.5194/se-2-1-20-211.
3. Kachakhidze M., Kereselidze Z., Kachakhidze N, Ramishvili G., Kukhianidze V. In connection with identification of VLF emissions before L'Aquila earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2012. doi:10.5194/nhess-12-1009-2012.
4. Hayakawa M., Molchanov O.A. *Seismo-Electromagnetics; Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. TERRAPUB, Tokyo, 2002, pp. 1-477.
5. Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M.R. Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by 29 September 2009 Samoa earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2010, pp. 1061-1067, doi:10.5194/nhess-10-1061-2010.

6. Mognaschi E.R. On The Possible Origin, Propagation and Detectability of Electromagnetic Precursors of Earthquakes. IW2GOO. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, v. 43, 2002, pp. 111-118.
7. Feund F.T. Stress-activated positive hole charge carries in rocks and the generation of pre earthquake signals Electromagnetic Phenomena Associated with earthquakes edited by M. Hayakawa, Research Signpost, New Dehli, 2009, pp. 41-96.
8. Surkov V. V., Pilipenko A. Estimate of ULF electromagnetic noise caused by a fluid flow during seismic or volcano activity. Annals of Geophysics, vol. 58, No. 6, 2015. S0655; doi:10.4401/ag-6767.
9. Kereselidze Z., Kachakhidze M., Kachakhidze N., Kirtshalia V. Model of Geomagnetic Field Pulsations before Earthquakes Occuring. Nova Science Publishers, Georgian international Journal of Sciences and Technology, vol.2, 2010, pp.167-178.
10. 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., вып. 117, 2002, с. 238-244.
11. Кереселидзе З.А., Одилавадзе Д.Т., Геладзе Г.Г., Садрадзе Н.Г., Тваури Г.А. Модель локальной геомагнитной аномалии Цкалцминда-Уреки. Труды Института геофизики им. М. Нодиа, т. 61, 2009, с.113-120.
12. Trenkin A. A. Possible Influence of Telluric Current on Seismicity of the Earth's Crust in Seismoactive Zone. Geomagnetism and Aeronomy, v. 55, 1, 2015, pp. 133–138. doi: 10.1134/S0016793215010119.
13. Кобранова В.Н. Петрофизика, М. Недра, 1986, 1-391с.
14. Шимони К. Теоретическая электротехника, М., Мир, 1964, 73 с.
15. Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Martynenko O.V. Ionospheric total electron content variations observed before earthquakes: Possible physical mechanism and modeling. Proc. of MSTU, v. 12, 2, 2009, pp. 308-315.
16. Стеттон Дж. Теория электромагнетизма. М.-Л., ОГИЗ-Гостехиздат, 1948, 539 с.
17. Лихтер Я.И., Гульельми А.В., Ерухимов Л.М., Михайлова Г.А. Волновая диагностика приземной плазмы, Москва, Наука, 1988, 215 с.
18. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. УФН.Т.177 #11, 2007, с.1145-1177.
19. Helman D.S. Earth electricity: A review of mechanisms which cause telluric currents in the lithosphere. Annals of Geoph, 56, 5, 2013, G0564; doi:10.4401/ag-618.
20. Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М. Особенности регионального и локального береговых эффектов в магнитотеллурическом поле Камчатки. Геофизический журнал, т.18, №2, 2017. с.81-94.
21. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика, ч. 2. Москва, Мир, 1975, 512 с.
22. Уломов, В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: из- во ФАН, 1974, 218 с.
23. Kvavadze N., Kereselidze Z. Possibiliti of Resonant Amplification of VLF Electromagnetic Radiation Associated with Near Tskaltsminda-Ureki Area. Bull. Georg. Natl. Acad. Sci., vol. 13, no. 4, 2019, pp.60-66.

**О ТЕЛЛУРИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ОНЧ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ
МАГНИТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ ЦКАЛЦМИНДА-УРЕКИ**

Кереселидзе З. А.

Реферат

На черноморском побережье Грузии, в курортном местечке Цкалцминда-Уреки существует локальная геомагнитная аномалия, простирающаяся между устьями рек Супса и Чолоки. Она занимает не только узкую береговую полосу, но распространяется также и в сторону моря. По результатам магнито-электрометрической разведки, эта территория является примером аномалии, малой по абсолютной интенсивности, но с резкими градиентами геомагнитного поля. Особые геофизические характеристики этого места складываются из-за действия нескольких взаимосвязанных природных

რის ერთერთ ინდიკატორს, დაფუძნებულია მდს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გენერაციის ინდუქციურ მექანიზმზე სიხშირეთა მახასიათებელ დიაპაზონში $10^3 \div 10^6$ ჰერცი. ასეთი გამოსხივება მაგნიტო-ელექტრული ანომალიის არეში შეიძლება იმდენად ძლიერი აღმოჩნდეს, რომ გამოიწვიოს ლოკალური მეტეოროლოგიური რეჟიმის ცვლილება ატმოსფეროს თერმოდინამიკური და ელექტრული პარამეტრების შემფოთების გამო.

**ON TELLURIC MECHANISM OF GENERATION OF VERY LOW
FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION IN
GEOMAGNETIC ANOMALY AREA OF TSKALTSMINDA-UREKI**

Kereselidze Z.

Abstract

A local geomagnetic (magnetolectric) anomaly is known to exist in the Black Sea coastline of Georgia, in Tskaltsminda-Ureki resort area. The anomaly encompasses a narrow territory between the estuaries of Supsa and Natanebi rivers and spreads in the direction of the sea. Based on multiyear geophysical exploration data, this territory represents a small magneto-electric anomaly of absolute intensity with sharp induction gradients of the geomagnetic field. Its particular geophysical characteristics are conditioned by a joint effect of several natural factors, such as: magnetit-rich sand carried by Supsa river from Guria-Ajara mountains; leakage of the sea water (hydration) into the solid medium of the coastline; magnetohydrodynamic (MHD) effect caused by movement of electroconductive liquid through magnetized porous medium. This gives possibility for a nonhomogeneous accumulation of bound and free polar charges. Thus, a polarized medium may acquire electric and magnetic characteristics as a result of variable electric field effect. Relaxation of free charges may occur due to locking of telluric currents generated as a result of development of a seismic process in the sea, also due to generation of VLF electromagnetic radiation accompanying these telluric currents. Such hypothesis is acceptable in the framework of a self-oscillation model of local electromagnetic circuit of the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere system. This model which is related to one of the indicators of the earthquake is based on an inductive mechanism of VLF electromagnetic radiation generation in characteristic range of frequencies $10^3 \div 10^6$ Hz. Such radiation in magnetolectric anomaly area can be so intense that it may cause changes in the local meteorological regimes due to disturbance of thermodynamic and electric parameters of the atmosphere.