

УДК 550.377

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20805

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ

© 2016 В.Б. Заалишвили, д.ф. – м.н., проф., Х.О. Чотчаев

Геофизический институт ВНЦ РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

Колебания солнечной активности и воздействие корпускулярного излучения Солнца на ионосферу порождает магнитотеллурические токи, приводит к структурным изменениям радиационного пояса Земли, изменению магнитного поля планеты, что ведет к изменению электрического поля внешней оболочки Земли. Взаимодействие ионосферных и индуктивных токов Земли, в условиях постоянно изменяющегося взаимоположения векторов электрического и магнитного полей оболочки вращающейся Земли, порождают атмосферные токи, проявляющиеся в виде грозových разрядов. Теллурические и атмосферные токи имеют различные спектральные и энергетические характеристики, используемые в прикладных целях для изучения строения и состава земной коры, литосферы и нижележащих геосфер Земли. Различные геологические и атмосферные условия могут вызывать и различные по характеристикам и видам физические поля, взаимодействие между которыми будет характерно только для данного геологического разреза. Именно эта особенность появления физических полей в Земле в результате взаимодействия геологических сред и внутренних процессов, а также геологических сред и внешних факторов планетарного и внепланетарного масштабов является основанием для исследования вариаций физических полей и оценки их корреляционных связей.

В статье рассматривается особенность проявления теллурических токов в условиях геологических и тектонических структур Большого Кавказа, приводится временной интервал их максимального генерирования, представляется глубинный геоэлектрический разрез, дается геологическое истолкование аномальным особенностям.

**Ключевые слова:** электромагнитные импульсы, теллурические и атмосферные токи, спектральный состав, Большой Кавказ, сезонная избирательность, структурно-тектонические неоднородности, геологические среды, землетрясения.

Использование магнитотеллурических токов для дифференцирования земной коры и верхней мантии, по изменениям с глубиной удельного электрического сопротивления геологического разреза, основано на принципе зависимости скин-эффекта от частоты и продолжительности становления (времени стабилизации или диффузии) генерирующего тока в земле. Источником генерации, согласно классической теории, являются естественные переменные квазигармонические электромагнитные поля космической и атмосферной (т.е. внешней) природы, в первом случае представляющие магнитотеллурические токи, а во втором – токи грозových разрядов («теллурики» и «атмосферики»). Магнитотеллурические токи являются следствием воздействия на ионосферу Земли корпускулярных излучений в виде солнечного ветра различной интенсивности и периодичности, вызванные разной активностью Солнца, приводящие к суточным, годовым и 11-летним изменениям структуры радиационного пояса Земли, что в свою очередь вызывает изменения в магнитном поле Земли и индуктивному изменению электрического поля Земли. В отличие от магнитотеллурических токов, теллурические токи обязаны своим про-

явлением индукционным токам, возникающим на границе двух геосфер: оболочки Земли (включая гидросферу) и ионосферы за счет механического трения между ними, изменения положения вектора магнитного поля Земли относительно ионизированной среды в процессе вращения и изменений структуры самой ионизированной среды в магнитном поле Земли под влиянием атмосферных явлений (температура, давление, ветровые перемещения и т. п.). Поле сторонних магнитосферно-ионосферных токов в отсутствие проводящей земли называются внешним, а часть поля, создаваемая теллурическими токами, индуцированными в проводящей земле, называется внутренним полем.

«Атмосферики» характеризуются как электромагнитные волны сверхнизкой частоты, возникающие при электрических разрядах молний. Спектр этих волн включает также декаметровый диапазон, используемый в геофизике при магнитотеллурическом зондировании больших глубин коры и верхней части мантии Земли. Магнитотеллурические вариации охватывают широкий частотный диапазон от 10–5 Гц (суточные) до 104 Гц (звуковые) и подразделяются на низкочастотные (собственно МТ вариации) и высокочастотные аудио-магнитотеллурические вариации звукового диапазона (АМТ вариации). Вариации в звуковом (АМТ) диапазоне связываются, главным образом, с приземными, грозовыми разрядами. «Атмосферики» сопровождаются свистом и шипением. Они возбуждают возмущения низкочастотного диапазона в интервале частот от единиц герц до десятков килогерц. Считается, что основным источником АМТ вариаций (атмосфериков) являются центры грозовой активности.

Геоманнитные вариации, обусловленные внутренними источниками, имеют периоды, исчисляемые многими столетиями, десятилетиями, годами и связаны они с процессами, происходящими в глубинных слоях Земли и земном ядре. Есть основания полагать, что таким процессом, в том числе, является и активная тектодинамика в зонах ВОЗ, деформационные и разрывные последствия которой, очевидно, преобразуется в электрические импульсы за счет таких явлений как магнито-, электрострикции, изменение магнитной индукции [Забирченко, 2014; Малышков Ю., Малышков С., 2009].

Существует представление [Паркинсон, 1986; Яновский, 1978], что вековые вариации характеризуются как часть постоянных флуктуаций величины и направления главного магнитного поля Земли с периодами от десятков до тысяч лет. Природа вариаций связывается с гидромагнитными волнами в ядре. При этом не исключается также влияние движения вещества внутри ядра.

Существенное влияние на изменение напряженности геомагнитного поля Земли оказывает намагниченность пород в земной коре под влиянием упругих напряжений, механизм которого основан на пьезомагнитном эффекте. Геостатические давления в земной коре величиной в сотни килограмм на квадратный сантиметр, благодаря этому эффекту, могут создавать аномалии магнитного поля интенсивностью в несколько нТл. При тектонических подвижках сбросово-надвигового характера, на фронтах упругих волн в очаговых зонах землетрясений, где давления могут составлять огромных значений, могут возникать значительные локальные магнитные аномалии, накладывающиеся на магнитное поле Земли, изменения которого индуцируют изменения электрических токов Земли.

В этой связи, с большой степенью достоверности можно увязывать с предстоящим землетрясением в соответствующем регионе аномальные изменения электро-

проводности геологической среды и вековые вариации электромагнитных полей, как последствия активной геодинамики [Мороз, Татьков и др., 2013].

Наиболее устойчивыми, постоянно и повсеместно существующими в утренние и дневные часы зимне-весеннего периода года и в годы повышенной солнечной активности, являются короткопериодные колебания (КПК) типа  $P_c$  с частотами ниже 1 кГц, выделенные по Международной классификации в диапазон ELF. Их спектр имеет максимум в интервале 10–60 сек. В геофизике используется интервал частот до 100 Гц этого диапазона.

Короткопериодные колебания геомагнитного поля в диапазоне частот от  $10^{-3}$  до 5 Гц.

Выделяются устойчивые квазисинусоидальные пульсации ( $P_c$ , pulsations continuous) и нерегулярные пульсации случайного характера ( $P_i$ , pulsations irregular). В диапазоне периодов от 10 сек. до 0,3 сек. наблюдается так называемая «мертвая зона», где интенсивность и вероятность появления КПК вариаций резко снижена. Различают два типа поляризации КПК – линейную и нелинейную. При линейной поляризации поле не меняет направление и изменяется только интенсивность. При нелинейной (эллиптической или круговой) поляризации меняется величина и направление поля. Вариации нелинейного типа являются наиболее благоприятными вариациями для зондирования, так как дают богатый материал для исследования горизонтальной неоднородности строения Земли при разном направлении поляризации первичного поля.

Измеряемыми параметрами являются электрические и магнитные составляющие напряженности магнитотеллурического поля, амплитуды и фазы которых зависят, с одной стороны, от интенсивности вариации теллурического и геомагнитного полей, а с другой – от удельного электрического сопротивления пород, слагающих геологический разрез.

По измеренным взаимно перпендикулярным электрическим и магнитным составляющим рассчитывается  $\rho$  однородного полупространства, т.е. нормальное поле, с помощью формулы из теории электроразведки:

$$\rho = aT (E_x/H_y)^2,$$

где  $T$  – период колебаний,  $a$  – коэффициент размерности, равный 0,2, если  $T$  измерено в сек.,  $E_x$  – в мВ/км,  $H_y$  – в нанотеслах (нТл),  $\rho$  – в Ом.

Удельное электрическое сопротивление, полученное по этой формуле над неоднородной средой, является кажущимся.

Распространенным способом решения обратной задачи является контролируемый метод трансформации, смысл которого заключается в расчете дифференциальной трансформации Молочнова – Ле Вьета, который представляет собой зависимость сопротивления от глубины, т.е. градиентный разрез. Его можно аппроксимировать слоистым разрезом с большим количеством тонких слоев мощностью  $h_i$  и сопротивления  $\rho_i$ . Для полученного многослойного разреза решается прямая задача и строится новая кривая  $\rho_m^{-1}(\sqrt{T})$ . Как правило, невязка между ней и исходной кривой кажущегося сопротивления  $\rho_m(\sqrt{T})$  оказывается большой. После этого производится коррекция разреза, полученного по данным дифференциальной трансформации, и повторяется процедура расчета прямой задачи. Для получения достаточно близкой к экспериментальной, применяется многошаговая итерационная процедура.

Из статистики устойчивого проявления сезонных вариаций интенсивности

ЕИЭМПЗ по Северному Кавказу за 2011–2014 гг. нарастание среднесуточного значения количества импульсов начинается в октябре-ноябре и продолжается до мая, достигая максимума в январе-марте, сезонный минимум приходится на летние месяцы. Заметны также промежуточные локальные максимумы в марте-апреле. При этом характерная форма суточных вариаций сохраняется. В связи с этой особенностью сезонного смещения фона, приходится использовать плавающий коэффициент нормирования при выделении аномалий.

При низкой солнечной активности в феврале 2012 года наблюдаются интенсивные вариации в восточной части Центрального Кавказа, что в условиях грозового затишья, можно увязать с теллурическими токами Земли.

Январские аномальные вариации 2013 года, в особенности на Эльбрусском участке, увязываются с числом Вольфа солнечной активности, что истолковывается как преобладание в составе электромагнитных полей магнитотеллурических токов.

Период январь-март 2014 года характеризуется также интенсивными электромагнитными полями с преобладанием магнитотеллурической составляющей.

График сезонных вариаций позволяет оптимизировать сроки проведения наблюдений, однако, учитывая орографические особенности горной части Большого Кавказа, магнитотеллурические исследования следует проводить поздней осенью и поздней весной.

В течение 2012–2014 гг. ОАО «Кавказгеолсъемка», при научно-методическом сотрудничестве с научными сотрудниками Геофизического института ВНИИ РАН, совместно с ООО «Сей-Эко-Геон» и ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика» были выполнены глубинные геофизические исследования по нескольким профилям на отдельных недостаточно изученных участках в Западной части Большого Кавказа с целью завершения создания относительно равномерной сети региональных профилей в качестве основы в дальнейшем для детального сейсмического районирования территории. Исследования выполнялись комплексом методов, включавшим гравимагнитные наблюдения, сейсморазведку МОВЗ и магнитотеллурические наблюдения в модификации МТЗ. По мере выполнения исследований вдоль одиночных региональных профилей (Эльбрусский, Туапсинский, ранее Степное – Бакуриани и Волгоград – Нахичевань) результаты нашли отражение в форме отчетов и, как правило, параллельно освещались в научных журналах [Шемпелев, Пьянков и др., 2005; Шемпелев, Фельдман и др., 2002; Краснопевцева и др., 1967, 1970]

Следуя этой традиции, предварительные результаты комплексных геофизических исследований по региональному Адыгейскому профилю (Краснодарский край) вдоль линии Дагомыс – г. Фишт – Майкоп – Гиагинская, дополненные соответствующими представлениями об особенностях глубинного поперечного разреза Восточной части Центрального Кавказа (Осетинский сектор), освещены также в печати [Шемпелев, Кухмазов и др., 2015].

МТЗ выполнено аппаратурой MTU-2E с шагом между пунктами –2,0 км при использовании в качестве базисной-MTU-5. Приемными линиями служили крестовые отрезки кабелей, длиной 50 и 90 м, оптимально подобранные опытным путем для сложного изрезанного рельефа и ориентированные соответственно по азимутам 0° и 90°, приемные линии заземлялись через неполяризующиеся электроды.

Расчет элементов тензора импеданса проведен с использованием соответствующих вычислительных программ, содержащихся в пакете CR4. Исходные данные пересчитаны в кривые  $\rho_k$  при помощи программы FURCOR. Геоэлектрический

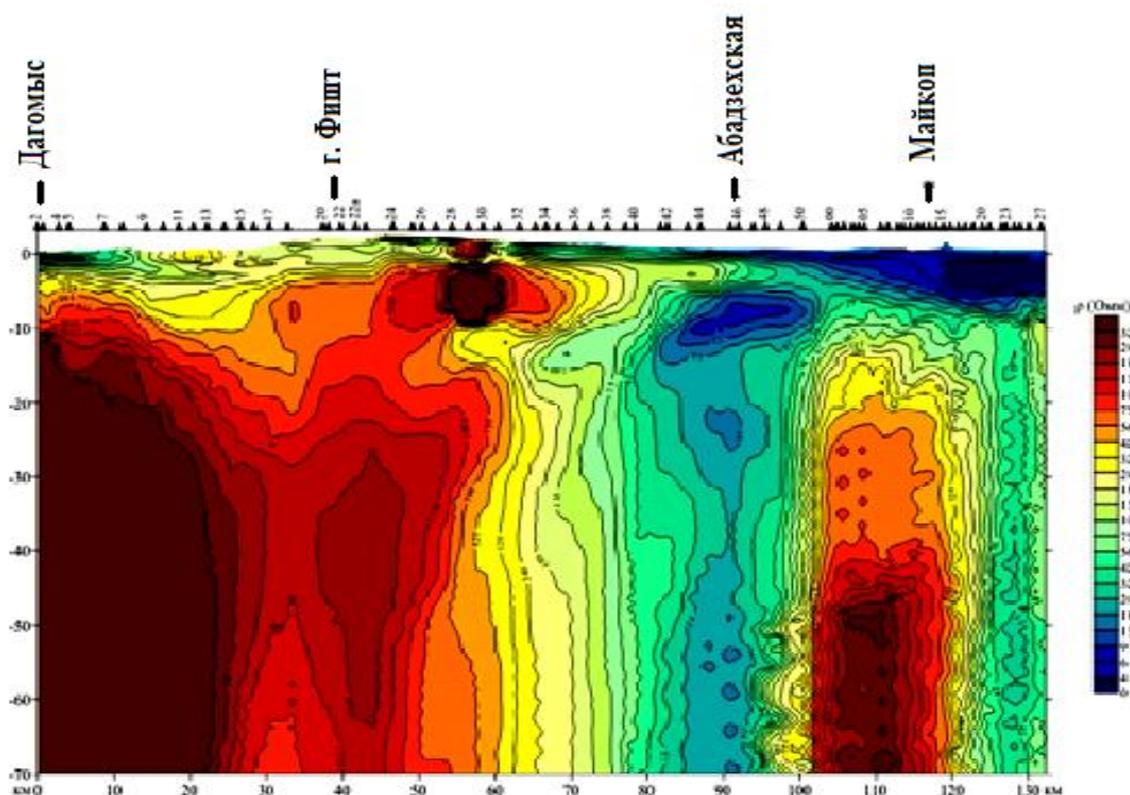


Рис. 1. Глубинный геоэлектрический разрез, станция МТЗ и их номера  
(Компаниец М.А., Шамановская С.П.)

разрез, совмещенный с глубинным сейсмогеологическим разрезом МОВЗ (рис. 2), приведен на рисунке 1.

При независимой интерпретации глубинного геоэлектрического разреза можно сделать следующие выводы:

- изолинии  $\rho_k$  отражают преимущественно латеральные изменения структуры и литологического состава разреза, характеризую ряд линеаментов территории, хотя такая специфика разреза кажущегося электрического сопротивления может быть вызвана значительной сложностью выделения МТЗ субгоризонтальных геологических границ с увеличением глубины, что связано с отсутствием эффективного способа учёта влияния глубинных неоднородностей для нормализации кривых при обработке;
- зона минимума кажущегося удельного сопротивления в интервале пунктов наблюдения 40–49 (район населенного пункта Абадзехская) на всю глубину зондирования отражает, по-видимому, Ахтырский глубинный шов (рис. 3);
- подошва мезокайнозойского осадочного чехла наиболее точно соответствует изооме 500 омм, удовлетворительно повторяя данные МОВЗ, как для покровно-надвиговых аллохтонов Южной части разреза, так и для пород интенсивно дислоцированного домезозойского основания и мезокайнозойского осадочного чехла Западно-Кубанского прогиба;
- высокоомная (1750–2000 омм) среда, на глубине ниже 10 км под Дагомысом идентифицируется с верхнемантийным субстратом Южных микроплит-террейнов с океаническим типом коры мощностью 5,0–5,5 км, которая к северу замещается также мантийной средой (1000–1750 омм), находящейся в ином температурном ре-

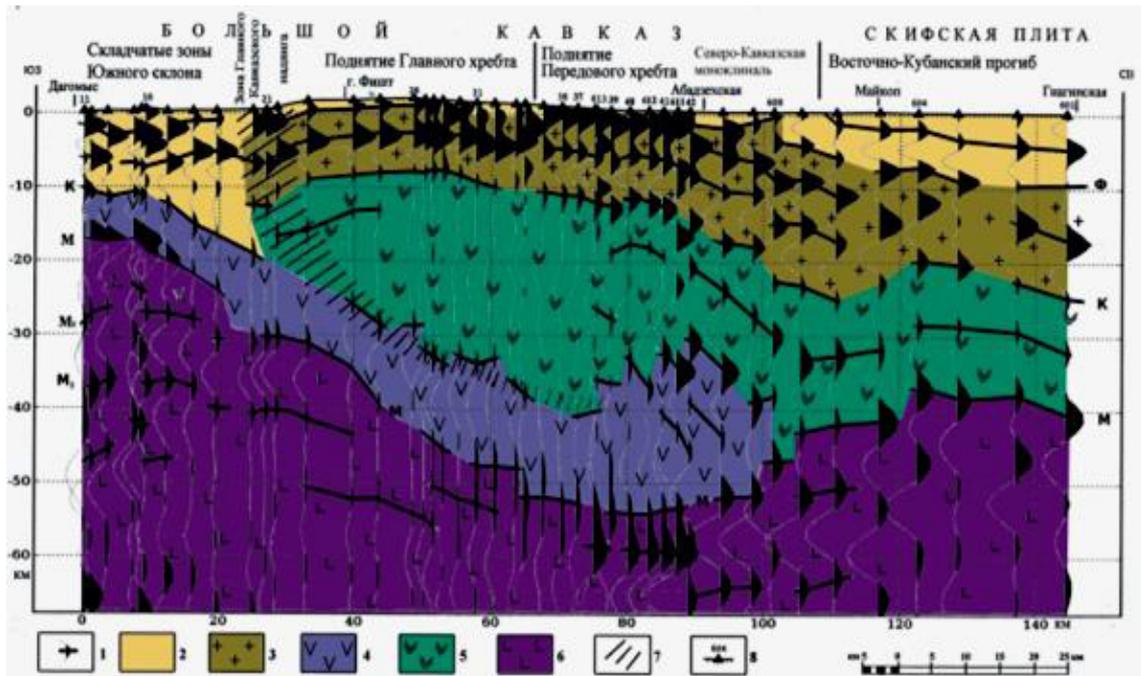


Рис. 2. Глубинный геолого-геофизический разрез

1 – функция приемника станции МОВЗ с обменной границей; 2 – мезокайнозойский осадочный чехол; 3 – гранито-метаморфический слой; 4 – базальтовый слой южной микроплиты; 5 – базальтовый слой Скифской плиты; 6 – верхняя мантия; 7 – зона Главного Кавказского надвига; 8 – линия профиля, станция МОВЗ и ее номер (по Шемпелеву А.Г., Кухмазову С.У., Лаврищеву В.А.)

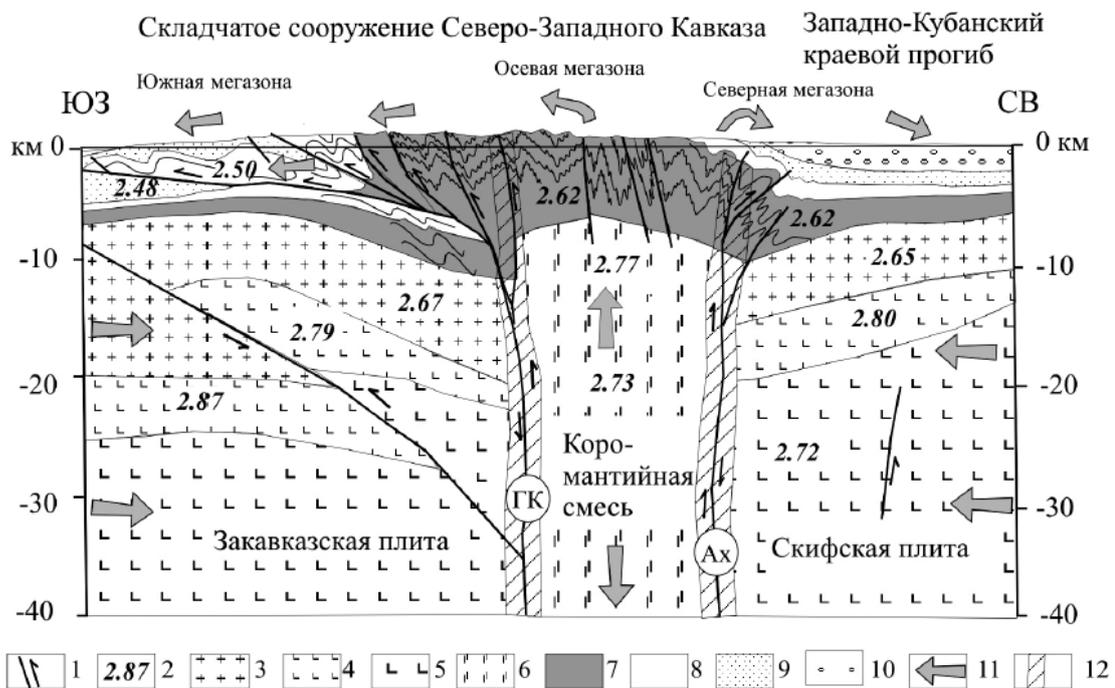


Рис. 3. Геолого-геофизическая модель глубинного строения Северо-Западного Кавказа (Туапсинское пересечение) по результатам исследования методами магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и обменных волн землетрясений (МОВЗ) (построена по данным И.И. Грекова, М.А. Компанейца, С.Г. Корсакова, С.У. Кухмазова, Н.И. Пруцкого, И.С. Фельдмана и А.Г. Шемпелева в структурной интерпретации Л.М. Расцветаева и А.В. Маринина)

жиме и конвективного воздействия высокотемпературных флюидов, способствующих понижению удельного электрического сопротивления среды;

- на участке профиля Дагомыс – г. Фишт поверхность кровли коры к северу погружается под углом около  $30^\circ$ , далее к северу перекрываются однотипными образованиями блоково-тектонической структуры; подошва суммарной океанической и континентальной коры не превышает 30–35 км;

- характерные точки Главного Кавказского надвига можно выделить на глубине порядка 45 км под пунктами №№ 26–28, 20 км – под пунктом наблюдения МТЗ № 18, 10 км – под пунктом № 15, что позволяет оценить угол его падения на этом интервале в  $60^\circ$ ;

- полая приповерхностная структура в интервале пунктов наблюдения №№ 24–36 представляется геологическим образованием, подвергнутому динамическому смещению в коре континентальной плиты и ставшему причиной зарождения очередного отрога Бокового хребта;

- уверенно выделяемая данными более 20 пунктов наблюдений МТЗ коромантийная структура севернее Ахтырской шовной зоны интерпретируется как глубинное продолжение Адыгейского выступа, выраженное в кровле мощным чехлом осадочных пород до глубины 11–12 км, подстилаемых толщей консолидированной коры мощностью 26–28 км и ниже мантийным субстратом;

- поверхность Мохо фиксируется фрагментарно или вообще не находит своего отражения. В то же время комплексы горных пород верхней части разреза в поле кажущихся электрических сопротивлений прослеживаются довольно уверенно, так как в этом случае нормализацию кривых МТЗ для устранения искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями, удается провести достаточно корректно;

- при сопоставлении результатов комплексных геофизических исследований вдоль Адыгейского профиля с известными геофизическими материалами ГСЗ, МОВЗ и МТЗ по другим региональным профилям отмечается сходство в элементах глубинного строения в различных частях Центрального Кавказа. Это приводит к выводу о вероятном образовании всей орогенной структуры Большого Кавказа, как части Альпийского коллизионного пояса, за счёт пологого надвига (наползания) земной коры Скифской плиты Скифско-Туранской платформы на консолидированную кору коллажа южных микроплит, обрамляющих с севера Аравийскую плиту.

## Литература

1. Забирченко Д.Н. Сезонные циклические вариации геофизических полей. Анализ наблюдений ЕИЭМПЗ по сети станций Северо-Кавказского региона». Геология и геофизика Юга России, № 3, 2014.
2. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Попов Е.А. Геофизические исследования на региональном профиле Волгоград – Нахичевань // Изв. АН СССР. Сер геол. 1967. № 12. С. 43–51.
3. Краснопевцева Г.В., Матушкин Б.А., Шевченко В.И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное-Бакуриани на Кавказе // «Советская геология». 1970. № 8. С. 113–120.
4. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 2, с. 152–172.

5. Мороз Ю.Ф., Татьков Г.И., Мороз Т.А., Тубанов Ц.А., Предеин П.А. Изменение геомагнитного поля и магнитного типпера в Байкальской рифтовой зоне. Геофизические исследования, 2013, том 14, №3, с. 10–23.
6. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 528 с.
7. Шемпелев А.Г., Пьянков В.Я., Лыгин В.А., Кухмазов С.У., Морозова А.Г. Результаты геофизических исследований вдоль Приэльбрусского профиля (вулкан Эльбрус – Кавказские Минеральные Воды) // Региональная геология и металлогения. С.-Пб.: Изд. ВСЕГЕИ. №25. 2005. С. 178–185.
8. Шемпелев А.Г., Фельдман И.С., Окулесский Б.А., Кухмазов С.У. Результаты МОВЗ и МТЗ по Туапсинскому профилю // Геофизика. 2002. №2. С. 55–59.
9. Шемпелев А.Г., Кухмазов С.У., Чотчаев Х.О., Невский Л.Н. Структура Большого Кавказа – результат пологого надвига Земной коры Скифской плиты на консолидированную кору Закавказских микроплит. Геология и геофизика Юга России, №4, 2015.
10. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 578 с.

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20805

## **CLASSIFICATION OF NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELDS. RESEARCHES BY THE METHOD OF TELLURIC CURRENTS**

**© 2016 V.B. Zaalishvili, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., Kh.O. Chotchaev**

Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center, Russia, 362002, Vladikavkaz,  
Markov str., 93a, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

The fluctuations of solar activity and the action of the sun corpuscular radiation on the ionosphere generates magnetotelluric currents leads to structural changes in the Earth radiation belt, change in the planet magnetic field, which leads to a change in the electric field of the Earth's outer shell. Interaction of the ionospheric and inductive currents of the Earth, under the conditions of the constantly changing relative position of the revolving Earth's shells electrical and magnetic fields vectors generate the atmospheric currents, which are manifested in the form of the lightning discharges. Telluric and atmospheric currents have different spectral and energy characteristics, used for the practical purposes for studying of structure and composition of the Earth's crust, lithosphere and underlying Earth's geospheres. Different geological and atmospheric conditions can cause physical fields different in the characteristics and types, interaction between which will be typical only for this geological section. Specifically, this special feature of the appearance of Earth's physical fields as a result of geological environment and internal processes interactions; also geological environment and external factors of planetary and extra-planetary scales is base for the variations in the physical fields and their correlations investigating. Special feature of the telluric currents manifestation under the geological and tectonic structures of the Greater Caucasus conditions are examined, the time interval of their maximum generation, geoelectric section, anomalous special features of geological interpretation are given in the article.

**Keywords:** electromagnetic pulses, telluric and atmospheric currents, spectral composition, the Greater Caucasus, seasonal selectivity, structural-tectonic heterogeneities, geological environments, earthquakes.