

ГЕОЭЛЕКТРОКАРТИРОВАНИЕ

*Посвящается светлой памяти незабвенного учителя
Гранта Мартыновича Ванцяна,
предопределившего направление творческой
деятельности автора*

К ВОПРОСУ ГЕОЭЛЕКТРОКАРТИРОВАНИЯ ПАЛЕОРЕЛЬЕФА

Матевосян А.К.

*Институт геологических наук НАН РА
0019 Ереван, пр. Маршала Баграмяна, 24а, Республика Армения,
E-mail: arshak.matevosyan@yandex.ru
Поступила в редакцию 10.04.2019*

Представлены результаты физического моделирования палеодолины с применением вертикального электрического зондирования, выполненного в объемном электролитическом баке. Даны рекомендации по выбору рационального электроразведочного комплекса с целью повышения достоверности и результативности полевых исследований палеорельефа.

Ключевые слова: электроразведка, круговое вертикальное электрическое зондирование, физическое моделирование, палеодолина, геокартирование.

В настоящей статье приведены основные результаты физического моделирования, полученные в процессе выполнения дипломной работы автора *“Применение электроразведки для решения гидрогеологических вопросов в районе массива г. Арагац”*, защищенной в 1978 году на геологическом факультете ЕГУ под научным руководством кандидата геол.-мин. наук Г.М. Ванцяна (1979). Результаты экспериментальных исследований в формате статьи *“Применение моделирования для решения электроразведочных задач, связанных с картированием погребенных долин”* были признаны одной из лучших студенческих научно-исследовательских работ по естественным, техническим и гуманитарным наукам по итогам республиканского тура Всесоюзного конкурса. Несмотря на пройденный значительный срок, нижепредставленный материал нами не опубликован, однако и сегодня не потерял своей научной новизны и актуальности.

В настоящее время возрастающий интерес представляют вопросы, касающиеся изучения погребенных долин и установления палеорельефа

(Минасян, Варданян, 2003; Մինասյան, Վարդանյան, 2014; Գրիգորյան, Վարդանյան, 2018; Դևրդյան, 2018; Варданян, 2018). Одним из таких районов является вулканический массив горы Арагац, представленный мощными лавовыми образованиями, покрывающими палеорельеф (Геология ..., Геоморфология, 1962; Минасян, 1977; Изучение ..., 1989). По погребенным долинам, вследствие трещиноватости лавового потока и наличия водоупорных вулканогенного-осадочных пород протекают подземные водотоки, которые аккумулируются лавовыми образованиями (Геология ..., Гидрогеология, 1974).

Для изучения характера кривых **вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)** над погребенными долинами нами проведено физическое моделирование в объемном электролитическом баке. Соблюдая критерии геометрического и электрического подобия геоэлектрической модели и реальной среды, были изготовлены модели наиболее вероятных форм погребенных долин. Поскольку лавовые образования характеризуются высокими значениями удельного электрического сопротивления ($\rho=1500\div 4000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а водоупорные осадочные породы – низкими ($\rho=10\div 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) (Геология ..., Геофизика, 1972; Минасян, 1977; Изучение ..., 1989), была создана двухслойная среда $\rho_2/\rho_1\rightarrow 0$, где слой ρ_1 имитировал базальты, а слой ρ_2 – глинистые породы. Технологически модель была изготовлена из раствора электролита с удельным электрическим сопротивлением $\rho_1=31 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и изогнутого алюминиевого листа трапециевидной формы. Измерения проводились с помощью аппаратуры ИКС-1. В процессе моделирования выполнены зондирования по профилям, вдоль и поперек имитированной долины. Полученные кривые ВЭЗ в первом приближении отображают двухслойный разрез с конечной ветвью, резко наклоненной вниз, причем в зависимости от положения точки ВЭЗ и азимута разносов, кривые смещены друг относительно друга по оси абсцисс (*полуразноса питающих линий*). Погрешность измерений не превышала 5%.

По данным интерпретации ВЭЗ (*вдоль имитированной долины*) с помощью палеток, рассчитанных для геоэлектрического разреза с плоскопараллельными слоями (Пылаев, 1974; Электроразведка, 1989), получены представленные на рис.1 графические зависимости h_k от h_1 (*нормированные по величине d*). Здесь h_k – кажущаяся мощность первого слоя, определенная в результате палеточной интерпретации; d и s – параметры долины: высота и ширина в средней ее части; h_1+d – истинная (*максимальная*) мощность первого слоя (ρ_1) над долиной.

Как видно из рис.1а (при $s/d=2.3$), начальная ветвь кривой в пределах точности эксперимента можно принять за прямую, наклоненную к оси абсцисс под углом $\alpha\approx 40^\circ$ при $h_1/d\leq 8$ и под углом $\alpha=45^\circ$, когда h_1 больше $8d$, при этом начало кривой соответствует $h_k\approx d$. Аналогичная зависимость, приведенная на рис.1б, получена при моделировании относительно узкой долины (*с величиной отношения s/d=1.4*), которая имеет вид кривой, начало которой близка к ординате $h_k/d\approx 0.6$, а конечная ветвь также соот-

ветствует асимптоте, наклоненной под углом 45° , и практически сливается с ней уже при $h_1 > 6d$. При значительной мощности первого слоя погребенная долина экспериментально не проявляется (уменьшается вероятность ее обнаружения путем ВЭЗ). В обоих приведенных случаях кривая начинается с величины h_k/d , приблизительно соответствующей минимальному расстоянию центра установки ВЭЗ до границы первого и второго слоев, причем фактическая глубина залегания основания долины не меньше глубины, определенной с помощью палеток ($h_k \leq h_1 + d$), что отчетливо проявляется на рис.1. Иными словами, по результатам множества выполненных зондирований (при разных центрах и азимутах разносов линий установки измерений), установлено, что величина фактической глубины границы слоев больше, чем при палеточной интерпретации кривых ВЭЗ. В соответствии с этим при определении истинной глубины залегания погребенной долины, необходимо введение поправки, которая может быть оценена (вычислена) по полученным зависимостям.

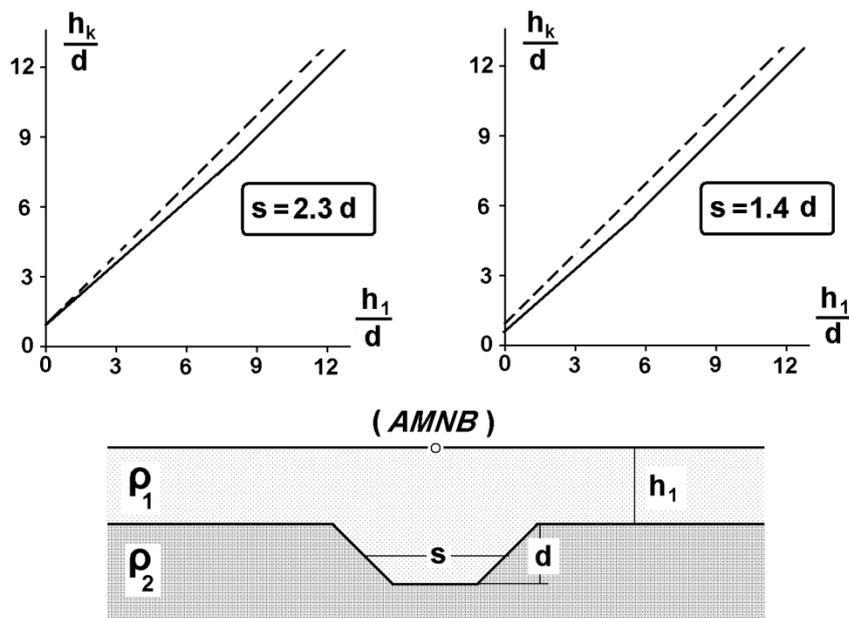


Рис.1. Экспериментальные зависимости $h_k=f(h_1)$ (нормированные по величине d) по результатам продольно-осевых ВЭЗ при двух формах модели погребенной долины. Пунктирная прямая – фактическая глубина залегания дна долины в центре зондирования.

Для определения ширины имитированной долины проводились зондирования в поперечном направлении при различных величинах смещения центра установки от ее оси (m). При интерпретации модельных кривых ВЭЗ с помощью двухслойной палетки установлено изменение h_k по профилю, перпендикулярному к оси долины. Результаты исследований в случае широкой долины отражены на рис.2, из которых следует, что максимальные значения h_k наблюдаются симметрично при смещении центра зондирования на величину, равную половине ширины долины. С

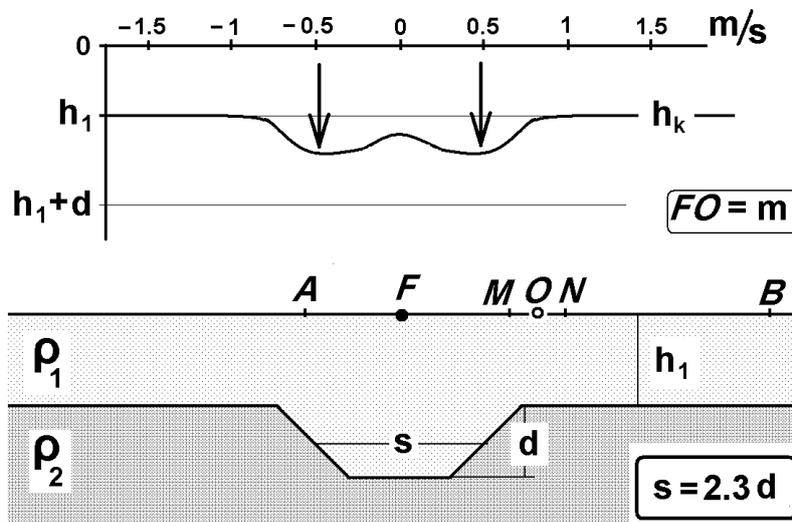


Рис.2. Зависимость кажущейся мощности первого слоя h_k от величины смещения центра (m) поперечного ВЭЗ. Стрелками отмечены максимальные области h_k .

уменьшение ширины долины максимальные значения h_k постепенно сближаясь, проявляются в виде одного максимума. Заметим, что кривые аналогичного вида получены при электропрофилировании над погруженными плохопроводящими локальными объектами (Блох, 1971; Вешев, 1980).

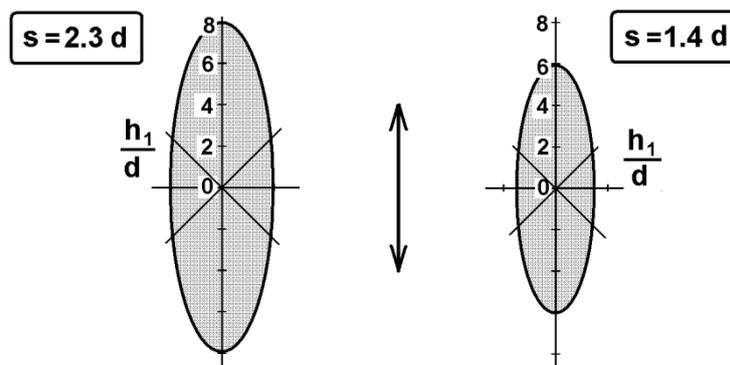


Рис.3. Круговые диаграммы зависимости h_1/d (нормированные по d) от азимута простирания модели погребенной долины. Стрелкой показано направление оси долины.

На рис.3 изображены круговые диаграммы зависимости h_1/d от азимута разносов AB при разных значениях соотношения s/d , построенные на основе данных зондирования с центром над осью долины. Круговая диаграмма ограничивает ту область значений h_1/d , при которых возможно обнаружение долины с помощью ВЭЗ. Иными словами, за пределами оконтуренных областей, экспериментально выявить изменение кривых ВЭЗ в присутствии и отсутствии модели долины не удалось. При этом установлено, что имитированная долина может быть прослежена, если

$h_1/d \leq 6 \div 8$ при продольно-осевом зондировании и $h_1/d \leq 1.5 \div 2$ – при поперечном профиле измерений.

- Основываясь на данных моделирования можно сделать следующие выводы:
- по результатам электропрофилирования (симметричной установкой с двумя питающими линиями), выполненного вкрест простирающейся погребенной долины, имеется принципиальная возможность оценки ее ширины (которая, при оптимально выбранных разносах питающих электродов, проявляется двумя относительно низкими значениями кажущегося сопротивления при большем размере питающей линии);
- круговые зондирования позволяют уточнить направление оси долины и получить определенное представление о ее форме;

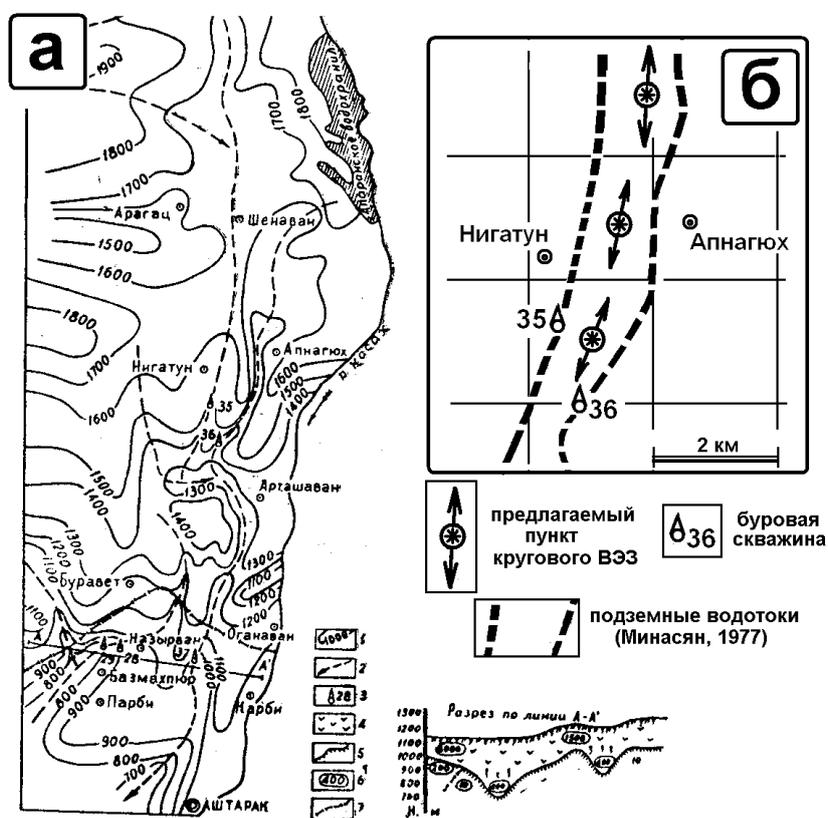


Рис.4. Карта рельефа регионального водоупора восточной части массива горы Арагац (Минасян, 1977) и фрагмент этой карты (справа вверху) с расположением предлагаемых пунктов зондирования.

- по представленным результатам модельных ВЭЗ можно определить фактическую глубину залегания основания долины путем введения поправочного коэффициента в результаты палеточной

интерпретации, что позволит построить более точную карту водоупорного горизонта.

В качестве практической реализации данных лабораторных работ, рассмотрена схематическая карта рельефа водоупора восточной части массива горы Арагац (рис. 4а), представленная в статье (Минасян, 1977).

Здесь, при проведении ВЭЗ по параллельным профилям вкрест предполагаемым подземным водотокам, прослежены два максимума значений глубины залегания водоупорного горизонта (рис.4б – *фрагмент карты*).

Учитывая модельную зависимость (рис.2) можно предположить, что эти максимумы (“*водотоки*”) отмечают ширину долины и показывают ее ориентацию (*направление простирации*). Это обстоятельство позволяют заключить о существовании в этом районе не двух практически параллельных подземных водотоков, а одной погребенной долины, простирающейся в суб-меридиональном направлении шириной 750÷2000 м и глубиной 300÷700 м, к которой приурочены подземные воды реки Палеокасах.

Для подтверждения данного предположения, рекомендуется выполнить вертикальные электрические зондирования между представленными водотоками, с ориентацией разносов установки измерений параллельными к ним. Если, при этом, определяемая глубина залегания водоупорных пород (*по данным палеточной интерпретации полевых кривых ВЭЗ*) будет значительно превышать значений глубины, полученных при поперечном зондировании (Минасян, 1977; Изучение ..., 1989), то (*согласно* рис.3) на рассмотренном участке подтвердится предсказание\ высказывание о наличии одной широкой погребенной долины.

Заключение

В заключении вкратце представим, что можно сегодня добавить по вопросу, затронутому в настоящей статье. Вышеприведенные результаты физического моделирования – эта всего лишь одна конкретная задача в актуальной и достаточно сложной объемистой проблеме, как исследование палеорельефа и выявление подземных водотоков. Пространственно-временные физико-химические характеристики реальной геологической среды настолько разнообразны и искажены множеством естественных и антропогенных мешающих факторов, и очевидно, для установления закономерностей их проявления требуется многодисциплинарный системный подход (Комплексирование ..., 1984). Несомненно, электроразведка являлась и в настоящее время является самым эффективным и основным методом по геокартированию палеорельефа, представленного породами (*литологическими разностями*) значительно контрастными по электрическим свойствам (*удельному сопротивлению и поляризуемости*) (Геология ..., Геофизика, 1972; Электроразведка, 1989; Минасян, Варданян, 2003; Մրիւնիւնիւնի, Վարդանյանի, 2014; Քրիզոնիւնի, Վարդանյանի, 2018; Варданян, 2018). Надежное \достоверное выявление\ оконтуривание локальных объектов (*электрических неоднородностей*), в данном случае представ-

ленных обводненными\ водонасыщенными областями в относительно однородных лавовых образованиях с изменяющейся мощностью, значительно затрудняет задачу исследований. Поскольку каждому электроразведочному методу присущи свои преимущества и недостатки, то сегодня не следует ограничиваться только традиционными методами: **вертикальным электрическим зондированием (ВЭЗ)** и **симметричным электропрофилированием (СЭП)** с двумя разносами питающей линии (Инструкция ..., 1984; Электроразведка, 1989; Минасян, 1977; Изучение ..., 1989; Դեմիրճյան, 2018). Применение **зондирования методом вычитания полей (ЗМВП)** (Рабинович, 1962; Изучение ..., 1989; Demirtshyan ..., 2018) целесообразно при исследовании одномерной (*горизонтально-слоистой*) геоэлектрической среды с практически идеальным плоско-параллельным строением (*дифференциацией по удельному сопротивлению*). В остальных случаях (*тем более в присутствии горизонтальных электрических неоднородностей*), отмеченный способ зондирования абсолютно бессилён и не продуктивен (*к тому же, с учетом технологических трудностей – в полевых условиях одновременного возбуждения высоко стабилизированного электрического поля двумя автономными питающими линиями*). Кроме этого, с применением современной высокоточной цифровой измерительной аппаратуры, не трудно получение высококачественных кривых **ЗМВП** путем несложных математических манипуляций\ преобразований из обычных данных ВЭЗ. Ввиду этих обстоятельств, способ **ЗМВП** не находит практического применения.

Выбор рационального электроразведочного комплекса должен быть основан на индивидуально-творческом подходе и профессионально обоснованном (*исходя из специфических особенностей конкретно поставленной задачи с учетом имеющихся материально-технических средств, финансовых возможностей и временных ограничений*) применении методов **сопротивлений (МС)**, **вызванной поляризации (ВП)** (*с правильно выбранным частотно-временным диапазоном измерений*) в разных модификациях (**электротомография** (Storz, 2000; Бобачев, 2013), **векторная съемка** с использованием эффективных площадных систем возбуждения и измерений первичного и вторичного электрических полей (Матевосян, 2002; 2003³; 2017) и **многоазимутальное комбинированное зондирование** (Матевосян, 2003¹; 2003²) с возможностью получения высокоинформативных тензорных параметров кажущегося сопротивления, кажущейся поляризуемости и амплитудно-временных зависимостей ВП) и **блуждающих токов (БТ)** (Скважинная ..., 1989; Матевосян, 2003³). Здесь следует также подчеркнуть важность лабораторных исследований физико-химических свойств (*главным образом пористость, трещиноватость, минерализация поровой влаги*) и петроэлектрических характеристик (Физические ..., 1984) (*включая анизотропию по удельному электрическому сопротивлению и поляризуемости с использованием векторной лабораторной установки* (Матевосян, 2003⁴)) образцов и моделей горных пород, а также параметрических измерений (*натурных полевых работ*) изучае-

мой геоэлектрической среды (Электроразведка, 1989; Скважинная ..., 1989).

На стадии детальных работ, с целью обнаружения\выявления и исследования **подземных водотоков, являющихся составной частью мало-глубинных геодинамических процессов**, в комплекс рекомендуется включить электромониторинг **естественного (ЕП)** и искусственных электромагнитных полей, **метод заряда (МЗ)** с привлечением **геофизических исследований скважин (ГИС)** (Скважинная ..., 1989; Электроразведка, 1989), а также использовать имеющиеся качественные априорные геологические данные, что в целом существенно сузит области эквивалентных решений (Комплексирование, 1984) и повысит достоверность, информативность и результативность геоэлектрокартирования.

Настоящая статья приурочена **к 100-летию со дня рождения Гранта Мартыновича Ванцяна**. Автор выражает искреннюю признательность Барышеву Сергею, принимавшему активное участие при проведении экспериментальных исследований, а также Минасяну Роберту Сарибеквичу, непосредственно руководившему полевыми научно-исследовательскими работами при прохождении автором преддипломной практики.

Литература

- Блох И.Х. 1971, Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Недра, 216 с.
- Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. 2013. Электроразведка. Том II. Малоглубинная электроразведка. М., МГУ, 124 с.
- Варданиян В. П. 2018, Распределение подземного стока водосборного бассейна озера Севан (по данным электротзондирования и бурения). Ученые записки ЕГУ. Геология и география, №2, с. 79-87.
- Вешев А.В. 1980. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 391 с.
- Геология Армянской ССР. 1962, том I. **Геоморфология**. Ереван, Изд. АН АрмССР, 586 с.
- Геология Армянской ССР. 1972, том X. **Геофизика**. Ереван, Изд. АН АрмССР, 276 с.
- Геология Армянской ССР. 1974, том VIII. **Гидрогеология**. Ереван, Изд. АН АрмССР, 392 с.
- Грант Мартынович Ванцян. 1979. Известия АН АрмССР, Науки о Земле, XXXII, №2, с.90-92.
- Изучение подземных вод вулканических областей геофизическими методами**. 1989. Сост.: Р.С. Минасян. – М.: Недра, 198 с.
- Инструкция по электроразведке**. 1984, Л., Недра, 352 с.
- Комплексирование методов разведочной геофизики**. 1984. Справочник геофизика. М.: Недра, 384 с.
- Матевосян А.К. 2002, Особенности квадриполюсной установки измерений при исследовании методами сопротивлений и вызванной поляризации. Изв. НАН Армении, Науки о Земле, LV, №1-3, с.59-62.
- Матевосян А.К. 2003¹, Многоазимутальное комбинированное электрическое зондирование. Известия НАН Армении, Науки о Земле, LVI, №1, с.50-58.
- Матевосян А.К. 2003², Трехазимутальная модификация МАК-зондирования. Известия НАН Армении, Науки о Земле, LVI, №2, с.56-59.
- Матевосян А.К. 2003³, Разработка теоретических основ методики векторной съемки. Автореф. док. дисс.. Ереван, ИГН НАН РА, 32 с.
- Матевосян А.К. 2003⁴, Крестовая лабораторная установка и методика исследования удельного электрического сопротивления и поляризуемости образцов. Изв. НАН Армении, Науки о Земле, LVI, №3, с.63-65.

- Матевосян А.К.** 2017, Основные направления оптимизации площадных детальных исследований методом вызванной поляризации. Изв. НАН Армении, Науки о Земле, 70, №1, с.10-23.
- Минасян Р.С.** 1977, Строение рельефа регионального водоупора и разделение подземного стока восточной части горы Арагац. Известия АН АрмССР, Науки о Земле, XXX, 3, с.75-81.
- Минасян Р.С., Варданян В.П.** 2003, Палеорельеф и распределение подземного стока центрального вулканического нагорья Армении. Ереван: Асогик, 151 с.
- Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований.** 1968. Пылаев А.М. – М., Недра, 148 с.
- Рабинович Б.И., Кежугин Н.Г.** 1962, Электрические зондирования методов вычитания полей. Геология и геофизика, №5, с.107-119.
- Скважинная и шахтная рудная геофизика.** 1989, Справочник геофизика. М.; Недра, в двух книгах - 320 с. и 440 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика).** 1984, Справочник геофизика М., Недра, 455 с.
- Электроразведка.** 1989, Справочник геофизика. М.: Недра, в двух книгах – 438 с, 378 с.
- Գրիգորյան Մ. Ա., Վարդանյան Վ. Պ.** 2018, Պալեոջրաերկրաբանական խնդիրների լուծումն էլեկտրահետախուզության ՌԻԷԶ եղանակով (Սևանի ջրհավաք ավազանի օրինակով): ԵՊՀ Գիտական տեղեկագիր: Երկրաբանություն և աշխարհագրություն, №1, էջ. 3-7.
- Դեմիրճյան Ս.Մ.** 2018, Հրաբխային տարածաշրջաններում հնահունների հայտնաբերման նպատակով էլեկտրահետախուզությունը որպես անհրաժեշտ մեթոդ: ՀՀ ԳԱԱ Տեղեկագիր, Գիտություններ Երկրի մասին, 71, №3, էջ43-50.
- Մինասյան Ռ. Ս., Վարդանյան Վ. Պ.** 2014, Ստորերկրյա ջրային ավազանների և հնահունների հայտնաբերում և ուսումնասիրություն (Արագածի հարավարևմտյան տեղամաս): ԵՊՀ Գիտական տեղեկագիր: Երկրաբանություն և աշխարհագրություն, №1, էջ. 52-55.
- Demirtshyan S.M., Minasyan R.S.** 2018, Features of the distribution of electric fields of multipoint grounding and their application in hydrogeology. Armenian Journal of Physics, vol. 11, №3, p.135-140.
- Storz H., Storz W., Jacobs F.** 2000, Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. Geophysical Prospecting, vol. 48, №3, p.455-472.

*Գրախոսողներ՝ Վ. Վարդանյան,
Ս. Հովհաննիսյան*

**ՊԱԼԵՈՌԵԼՅԵՖԻ ԵՐԿՐԱԷԼԵԿՏՐԱՔԱՐՏԵԶԱԳՐՄԱՆ
ՀԱՐՑԻ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԼ**

Մաթևոսյան Ա. Կ.

Ամփոփում

Հոդվածում, կիրառելով ուղղաձիգ էլեկտրական զոնդավորումներ ծավալային էլեկտրոլիտիկ բաքում, ներկայացված են պալեոհովիտի ֆիզիկական մոդելավորման արդյունքները: Պալեոռելյեֆի դաշտային ուսումնասիրությունների հուսալիության և արդյունավետության բարձրացման նպատակով, տրվում են առաջարկություններ ռացիոնալ էլեկտրահետախուզական համալիրի ընտրության վերաբերյալ:

ON GEOELECTROMAPPING OF PALEO-RELIEF

Matevosyan A.K.

Abstract

The article presents the results of physical modeling of paleo-valleys using vertical electrical sounding performed in a volume electrolytic tank. Recommendations are given on the choice of a rational electrical prospecting complex in order to increase the reliability and effectiveness of field studies of the paleo-relief.