

АРХЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

Пушкарев П.Ю.¹, Поротов А.В.², Бурнина Т.А.²

¹ Геологический факультет МГУ;

² Географический факультет МГУ

Геофизические методы довольно широко и успешно применяются при решении различных археологических задач, связанных как с поисками отдельных погребенных объектов, так и с прослеживанием границ между слоями различного состава и возраста, различающимися по своим физическим свойствам.

Для приморской полосы побережья Керченского пролива самостоятельный интерес представляет реконструкция палеотопографии прилегающей к античным городищам территории. Актуальность палеогеоморфологических исследования обуславливается изменениями рельефа прибрежной полосы суши под влиянием повышения уровня моря за последние 1.5 тыс. лет. Подъем уровня моря сопровождался масштабными плановыми перестройками контура береговой линии, последствия которой особенно заметны в вершинах открытых бухт и заливов. Примеры античных поселений, располагавшихся на побережье и располагающихся в настоящее время на значительном удалении от моря в результате активного нарастания приморской полосы береговой линии широко известны на побережье Черного и Средиземного морей.

Участок побережья к северу от мыса Ак-Бурун представляет собой полосу низменной суши, шириной до 2,5 км, приуроченной к низовьям долины р. Черубашки. Проведенное в последние годы изучение развития этого участка побережья показало, что в античное время территория приморской низменности была занята глубоким морским заливом, в вершине которого располагался мелководный лиман. Древнебереговая линия античного времени залегает вблизи подножий уступов коренного берега, ограничивающих древний залив с севера и юга. На северном борту его находился боспорский город Тиритака, а на южном - Нимфей. Возможно, что вблизи северной окраины плато, на котором находится Нимфей, располагалась упоминаемая в античных источниках гавань Нимфея. Повышение уровня моря за последние 1,5 тыс. лет сопровождалось выполнением береговыми наносами вершины залива и формирование низкой морской террасы. Нараставшая к северу аккумулятивная терраса полностью отгородила палео-Чурубашский лиман от моря, превратив его в озеро, а также протянулась севернее, отгородив от моря восточную окраину возвышенного плато, на котором расположено Тиритакское городище. Общая ширина сформировавшейся аккумулятивной террасы в вершине Камыш-бурунского залива составляет 2-2,5 км (Зинько, Поротов, 2013). В настоящее время территория представляет собой сильно измененную антропогенным воздействием (комплекс судоремонтного завода, отвал шлама горно-обогатительного комбината и т.п.) аккумулятивную морскую террасу, образованную серией древних береговых валов, которые отчетливо прослеживаются как на топографических картах 50-х годов, так и по аэрофотосъемочным материалам начала 50-х годов.

Для детализации реконструкций эволюции за последние 3,0 тыс. лет рельефа приморской территории, непосредственно прилегающей к южной и восточной окраинам Тиритакского городища, были проведены геолого-геоморфологические исследования (Зинько и др., 2011). Однако высокая техногенная измененность территории затрудняет проведение

археологических и геологических обследований территории, что предопределило целесообразность дополнения их применением геофизических методов. Материалы ранее проведенной электроразведки методом электротомографии ЭТ (Зинько и др., 2018) позволили существенно детализировать представления о структуре верхней части осадочного чехла на изучаемой территории, однако малая глубина электроразведки не дает возможности детально охарактеризовать рельеф более глубоких слоев, отражающих рельеф территории на ранних этапах голоценовой трансгрессии. С этой целью комплекс проводимых исследований был дополнен методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

При проведении полевых работ методом ВЭЗ использовались электроразведочный генератор Astra и электроразведочный измеритель APL-02, а также питающие и приемные электроды и соединительные провода. При проведении работ методом ВЭЗ использовалась четырехэлектродная симметричная установка ВЭЗ. При этом латунные приемные электроды М и N, подключенные к измерителю, располагаются в центре установки, а стальные питающие электроды А и В, подключенные к генератору, в каждой точке ВЭЗ пошагово удаляются от центра установки в разные стороны. Расстояние от питающего электрода А или В до центра установки О (т.е. расстояние АВ/2) называется разносом.

Постепенно увеличивая в каждой точке ВЭЗ разнос, мы тем самым увеличиваем глубинность исследования, и оцениваем изменение удельного электрического сопротивления земли с глубиной. Нами использовались разносы 1, 1.39, 1.93, 2.68, 3.73, 5.18, 7.2, 10, 13.9, 19.3, 26.8, 37.3, 51.8 метров (на некоторых точках максимальный разнос составлял 37.3 или 26.8 метров). Глубинность исследования можно грубо оценить в 1/3 величины разноса, точнее она оценивается при количественной интерпретации.

При увеличении АВ/2 (т.е. при удалении питающих электродов) поле в центре установки ослабевает. Чтобы уверенно измерять сигнал, нужно увеличивать длину приемной линии MN, что приводит к пропорциональному увеличению сигнала. Нами использовались приемные линии длиной 0.5 м при разносах от 1 до 10 м и длиной 2.5 м при разносах от 7.2 до 51.8 м. Таким образом, на разносах 7.2 и 10 м измерения проводились с обеими приемными линиями, все они учитывались при дальнейшей обработке сигнала.

На этапе обработки данных ВЭЗ осуществляется переход от измеренных значений разности потенциалов ΔU , с учетом силы тока I и геометрического коэффициента установки k, к кажущемуся удельному электрическому сопротивлению: $\rho_k = k \cdot \Delta U / I$.

Кажущееся сопротивление является трансформацией измеренного сигнала, и переход от него к истинному сопротивлению грунтов осуществляется далее при интерпретации (решении обратной задачи). Однако, кажущееся сопротивление дает качественное представление об изменениях истинного сопротивления с глубиной и вдоль профиля. На рисунках с результатами вдоль профилей вначале представлены псевдорезрезы ρ_k , на которых по горизонтали отложено расстояние вдоль профиля, а по вертикали – разнос АВ/2.

Под интерпретацией данных мы понимаем решение обратной задачи, которое дает геоэлектрическую модель, т.е. зависимость сопротивления от глубины, согласующуюся с наблюдаемыми данными (т.е. с ΔU или с ρ_k). При большом расстоянии между точками ВЭЗ мы пренебрегаем влиянием неоднородностей между ними, и считаем среду слоистой под каждой точкой. Объединяя колонки с зависимостью сопротивления от глубины вдоль профиля, мы получаем геоэлектрические разрезы, которые представлены для всех профилей.

Вследствие некорректности решения обратной задачи геофизики по одним и тем же данным можно построить множество эквивалентных моделей. Чтобы выбрать из этого

множества наиболее реалистичную модель, используется априорная информация об изучаемой среде, например, о положении тех или иных границ или вероятном сопротивлении тех или иных грунтов.

Обработка и интерпретация данных ВЭЗ по рассмотренной методике осуществлялась с помощью программы IPI2Win. Она обладает развитым пользовательским графическим интерфейсом. Обратная задача в этой программе решается методом подбора, т.е. решение получается путем перебора большого числа моделей и выбора из них тех, которые обеспечивают минимальную невязку наблюдаемых и модельных данных, и в то же время являются достаточно реалистичными.

Проведенное электротомографирование методом ВЭЗ рассматривало в качестве основной задачи получение профилей, полностью охватывающих поверхностный слой рыхлых отложений и позволяющих охарактеризовать рельеф поверхности коренных пород на участке, прилегающем с юга к Тиритакскому городищу. Проведенные в 2017 году геофизические исследования методом электротомографии (Зинько и др., 2018), несмотря на детальность полученных профилей, характеризовали поверхностный слой сравнительно небольшой глубины и не позволяли связать отмечаемые неоднородности в пространственной картине распределения проводимости с топографией пред-голоценовой поверхности.

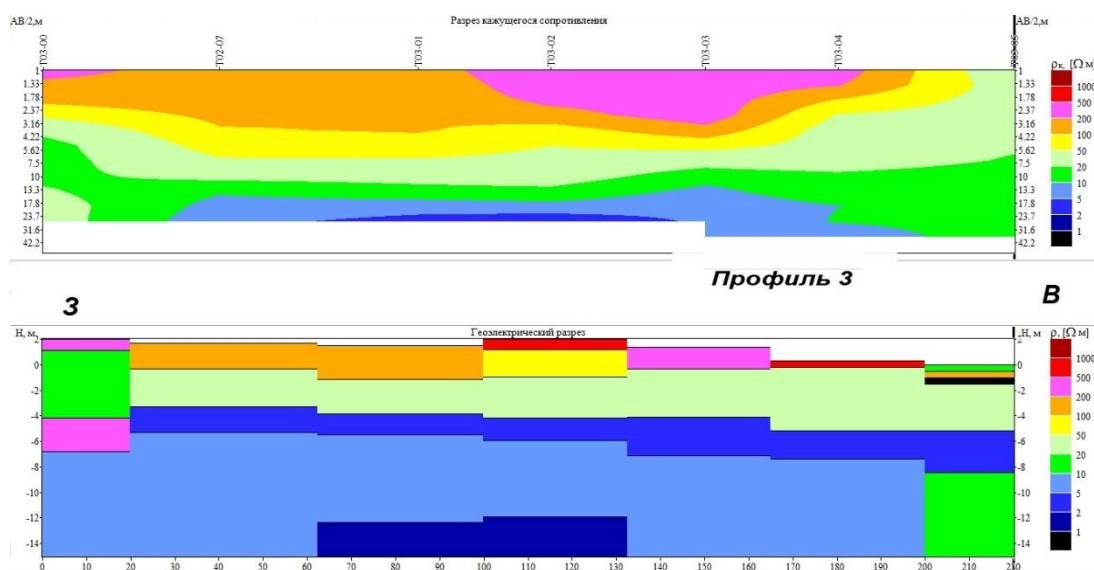


Рис. Псевдоразрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез по профилю 3

В связи с этим исследования методом ВЭЗ в какой-то части могут рассматриваться как дополняющие ранее проведенные ЭТ-зондирования, и, несмотря на свою ограниченную детальность, позволяющие получить более глубокий разрез, который в данной геологической ситуации полностью характеризует как распределение мощностей и общие черты строения голоценовых (рыхлых) отложений, так и рельеф поверхности подстилающих их более древних отложений, которые на данном участке представлены покровными суглинками, перекрывающими толщу глин позднего миоцена.

При этом важно отметить, что проводимый комплекс геолого-геофизических исследований направлен на реконструкцию палеотопографии южной окрестности Тиритаки, которая может рассматриваться в некотором роде «припортовым районом» в связи с расположенным вблизи юго-восточной окраины городища комплекса рыбозасолочных ванн (Зинько и др., 2011).

Представленные результаты электроразведочных работ, рассмотренные в контексте с проведенными ранее геологическими исследованиями этого района, позволяют внести следующие уточнения в существующие представления о топографии южной окраины Тиритаки в античное время.

Материалы метода ВЭЗ показали, что в пределах территории, прилегающей к южной окраине Тиритакского городища, наблюдается сравнительно выровненный и пологонаклонный в сторону моря рельеф поверхности коренных пород. По-видимому, устьевая часть эрозионной долины, в настоящее время значительно сnivelированной, располагалась вблизи юго-западной окраины городища, или протягивалась южнее в пределах полосы, занятой в настоящее время автодорожной магистралью и прилегающей к ней с запада полосе. В связи с плотной застройкой этой части территории, провести полноценные обследования на ней не представляется возможным. В ходе морской трансгрессии во 2 тыс. до н.э. море вплотную приблизилось к коренным бортам палео-Черубашского залива, что сопровождалось размывом восточного борта плато, на котором находится городище, а так же формирование узкой наносной полосы в вершине небольшой бухточки, образованной изгибом коренного берега к югу от городища. Возможно, что ее возникновение предопределилось общим понижением коренного рельефа в устьевой части долины ручья.

Данные электротомографии показывают наличие узких зон повышенной проводимости в полосе, непосредственно прилегающей к южной окраине городища, которые в настоящее время почти совпадают с линией теплотрассы. Эти полосы не имеют отражения в коренном рельефе и, возможно, связаны с временными протоками в устьевой зоне древнего ручья, дренировавшего овраг и впоследствии погребенными под толщей более молодых наносов.

Выполнение наблюдений осложнялось тем, что в некоторых местах приходилось преодолевать заросшие густым кустарником участки, а где-то наблюдения оказалось невозможно выполнить из-за закрытости, застройки, заасфальтирования части территории.

Помимо этого, на участке весьма интенсивен уровень техногенных помех. Это проявляется как в неоднородном верхнем слое, содержащем самые разные включения, от проводящих шпал до высокоомных пустот, замутняющих образ более глубоко залегающих структур. Так и в уровне электромагнитного поля, создаваемого ЛЭП и другими объектами, и ограничивающего возможности измерения слабых сигналов на больших разностях, отвечающих большим глубинам исследования.

Тем не менее, в районе работ удалось получить данные ВЭЗ достаточно хорошего качества, и оценить особенности геоэлектрического строения до глубин в первые десятки метров. Были, в частности, выделены коренные глины южнее городища, вскрытые ранее бурением. Проведена предварительная, наверное, довольно грубая стратификация вышележащего разреза.

Работа выполнена по программе «Палеоклиматы, развитие природной среды и долгосрочный прогноз ее развития» и при поддержке грантов РГО-РФФИ № 17-05-41041 и РФФИ 18-05-00296.

Список литературы:

1. *Зинько В.Н., Поротов А.В., Мысливец В.И.* Развитие рельефа западного побережья Керченского полуострова в позднем голоцене. Сб. «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа». Севастополь, 2011. Вып. 25, т.1.; с. 83-95 с.

2. *Зинько В.Н., Сергеев К.С., Поротов А.В.* Опыт применения электроразведки (ЭТ) при изучении Тиритакского городища // Боспорские чтения XIX, Керчь, 2018. С.162-169.

ARCHAEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF THE COAST OF THE KERCH STRAIT

Pushkarev P.¹, Porotov A.², Burnina T.²

¹ *Faculty of Geology of Lomonosov MSU;*

² *Faculty of Geography of Lomonosov MSU*

Geophysical methods are quite widely and successfully used to solve various archaeological problems associated both with the search for individual buried objects, and with tracking the boundaries between layers of different composition and age, differing in their physical properties.

For the coastal strip of the Kerch Strait, the reconstruction of paleotopography adjacent to the ancient settlement sites is of independent interest. The relevance of paleogeomorphological studies is determined by changes in the topography of the coastal strip under the influence of sea level rise over the last 1.5 thousand years. Sea level rise was accompanied by large-scale planned restructuring of the coastline contour, the consequences of which are especially noticeable at the tops of bays. Examples of ancient settlements located on the coast and currently located at a considerable distance from the sea as a result of the active growth of the coastal strip of the coastline are widely known on the coast of the Black and Mediterranean Seas.

The coastline north of Cape Ak-Burun is a lowland land strip, up to 2.5 km wide, confined to the lower reaches of the valley of the r. Cherubashka. Conducted in recent years, the study of the development of this section of the coast showed that in ancient times the territory of the coastal lowlands was occupied by a deep bay, at the top of which was located a shallow estuary. The coastline of ancient time lies near the foot of the ledges of the indigenous coast, bounding the ancient bay from the north and south. On the northern side of it was the city of Tyrityake of Bosphorus, and on the southern side - Nymphaion. It is possible that near the northern outskirts of the plateau on which Nymphaion was located, the harbor of Nymphaion mentioned in ancient sources was located. The sea level rise over the last 1.5 thousand years was accompanied by the execution of coastal loads by the top of the bay and the formation of a low sea terrace. The accumulative terrace growing to the north completely fenced off the Paleo-Churubash estuary from the sea, turning it into a lake, and stretched to the north, separating the eastern edge of the elevated plateau on which the Tyrityake fort was located from the sea. The total width of the accumulative terrace formed at the top of the Kamysh-Burunsky Bay is 2-2.5 km (Zinko, Porotov, 2013). At present, the territory is a strongly modified anthropogenic impact (shipyard complex, dump of sludge from mining and processing plant, etc.) accumulative marine terrace formed by a series of ancient coastal shafts, which can be clearly seen both on topographic maps of the 1950s, and on aerial survey materials of the early 1950s.

In order to elaborate the reconstruction of the evolution over the past 3.0 thousand years of the relief of the coastal territory directly adjacent to the southern and eastern outskirts of the Tyrityake settlement, geological and geomorphological studies were carried out (Zinko et al., 2011). However, the high technogenic variation of the territory makes it difficult to conduct archaeological and geological surveys of the territory, which predetermined the expediency of supplementing them with geophysical methods. The materials of the earlier survey with electrical resistivity tomography (ERT) method (Zinko et al., 2018) allowed for a thoroughly detailed understanding of the structure of the upper part of the sedimentary cover in the study area, but the small depth of electrical sounding does not make it possible to characterize in detail the relief of the deeper layers reflecting

the relief of the territory in the early Holocene stages transgressions. To this end, the complex of research conducted was supplemented by the method of vertical electrical sounding (VES).

When carrying out field work using the VES method, an Astra electrical prospecting generator and an APL-02 electrical prospecting meter, as well as current and potential electrodes and connecting wires were used. A four-electrode symmetrical VES array was used. In this case, the brass potential electrodes M and N, connected to the meter, are located in the center of the array, and the steel current electrodes A and B, connected to the generator, at each VES point are removed from the center of array in different directions. The distance from the current electrode A or B to the array center O (i.e. the distance $AB/2$) is called the spacing.

Gradually increasing the spacing at each VES site, we thereby increase the depth of the observation, and we estimate the change in the electrical resistivity of the earth with depth. We used the spacing 1, 1.39, 1.93, 2.68, 3.73, 5.18, 7.2, 10, 13.9, 19.3, 26.8, 37.3, 51.8 meters (at some sites the maximum was 37.3 or 26.8 meters). The depth of the observation can be roughly estimated at $1/3$ of the spacing, more precisely it is estimated by quantitative interpretation.

With increasing $AB/2$ (i.e. when removing the supply electrodes), the field in the center of the array weakens. To confidently measure a signal, it is needed to increase the length of the receiving line MN, which leads to a proportional increase in the signal. We used receiving lines with a length of 0.5 m with spacing from 1 to 10 m and a length of 2.5 m with spacing from 7.2 to 51.8 m. Thus, measurements at 7.2 and 10 m were measured with both receiving lines, all of which were taken into account in further signal processing.

At the stage of VES data processing, the transition from the measured values of the potential difference ΔU , taking into account the current strength I and the geometrical array coefficient k , is carried out to the apparent electrical resistivity: $\rho_a = k \cdot \Delta U / I$.

The apparent resistivity is a transformation of the measured signal, and the transition from it to the true resistivity of the soil is carried out further in the interpretation (solution of the inverse problem). However, apparent resistivity gives a qualitative picture of changes in true resistivity with depth and along the profile. In the figures with the results along the profiles, pseudosections of ρ_a are shown on top, where the distance along the profile is plotted horizontally, and the $AB/2$ spacing is shown vertically.

By data interpretation, we understand the solution of the inverse problem that gives the geoelectric model, i.e. dependence of resistivity vs depth, consistent with the observed data (i.e., with ΔU or with ρ_a). With a large distance between VES sites, we neglect the influence of inhomogeneities between them, and consider the medium as layered under each site. Combining the columns with the dependence of the resistivity vs the depth along the profile, we obtain geoelectric sections, which were constructed for all profiles.

As soon as the inverse problems of geophysics are ill-posed, using the same data, it is possible to construct a set of equivalent geoelectric models. In order to choose the most realistic model from this set, a priori information about the geological structure of the studied area is used, for example, the position of certain boundaries or the likely resistivity of certain soils.

The processing and interpretation of VES data according to the considered methodology was carried out using the IPI2Win program. It has an advanced user interface. The inverse problem in this program is solved by the trial-and-error method, i.e. the solution is obtained by considering a large number of models and choosing from them those that provide the minimum discrepancy between the observed and model data, and at the same time those that are quite realistic.

Electric sounding carried out by the VES method considered as the main task the obtaining of profiles completely covering the surface layer of loose sediments and making it possible to characterize the relief of the surface of bedrock in the area adjacent to the Tyritake settlement from the south. Geophysical surveys conducted in 2017 using ERT (Zinko et al., 2018), despite the detail of the profiles obtained, characterized the surface layer of relatively small depth and did not allow to associate the observed heterogeneity in the spatial pattern of the conductivity distribution with the topography of the pre-Holocene surface.

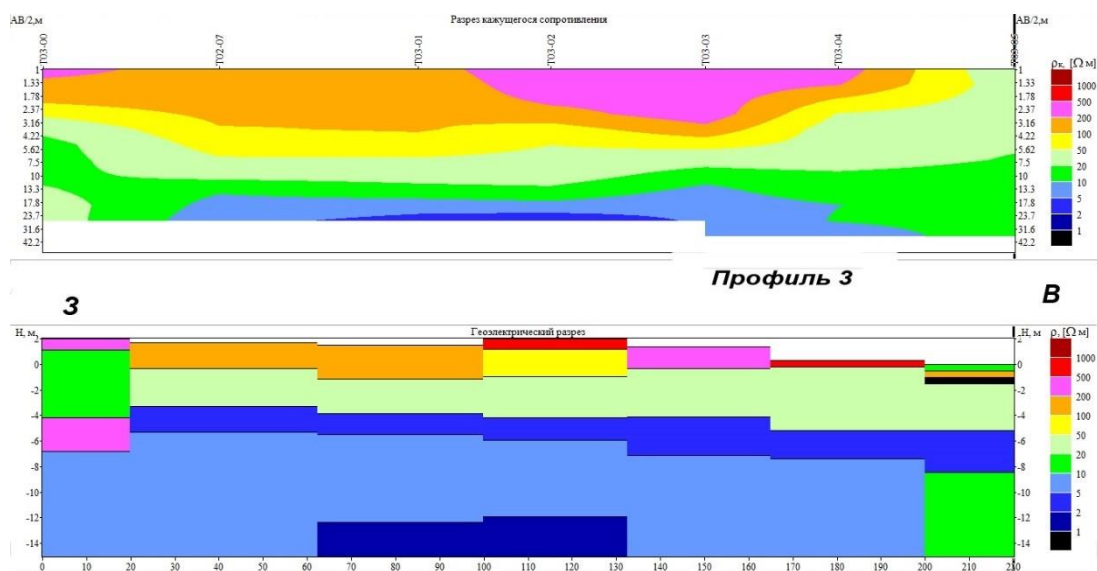


Fig. Pseudo-section of apparent resistivity and geoelectric cross-section along profile 3.

In this regard, studies by the VES method in some part can be considered as complementing the earlier conducted ERT survey, and, despite their limited detail, allowing to obtain a deeper section, which in this geological situation fully characterizes both the distribution of thicknesses and the general structure of Holocene (loose) sediments as well as the surface relief of the more ancient sediments underlying them, which in this area are represented by cover loams overlapping the basement of the Late Miocene clay.

At the same time, it is important to note that the geological and geophysical research complex being conducted is aimed at reconstructing the paleotopography of the southern neighborhood of Tyritake, which can be considered in some way a “port area” due to the location near the southeastern edge of the ancient settlement of the fish bath complex (Zinko et al., 2011).

The presented results of electrical exploration, considered in context with the geological studies previously conducted in this area, make it possible to make the following clarifications to the existing ideas about the topography of the southern margin of Tyritake in ancient times.

The results of the VES method showed that within the territory adjacent to the southern edge of the Tyritake settlement, there is a relatively flat and gently inclined towards the sea surface relief of the bedrock. Apparently, the mouth part of the erosion valley, now significantly leveled, was located near the southwestern outskirts of the settlement, or stretched to the south within the strip currently occupied by the highway and to the west adjacent to it. Due to the dense development of this part of the territory, it is not possible to conduct full-scale surveys on it. During the sea transgression in 2 thousand BC. the sea came close to the aboriginal sides of the Paleo-Cherubashky Bay, which was accompanied by erosion of the eastern side of the plateau on which the settlement was located, as well as the formation of a narrow alluvial strip at the top of a small cove formed by

the bend of the indigenous coast south of the settlement. It is possible that its occurrence was predetermined by a general decrease in the root relief in the mouth of the valley of the stream.

ERT data show the presence of narrow zones of increased conductance in the strip directly adjacent to the southern outskirts of the settlement, which now almost coincide with the line of the heating main. These bands are not reflected in the root relief and, possibly, are connected with temporary channels in the mouth area of an ancient stream that drained a ravine and subsequently buried under a layer of younger sediments.

The implementation of observations was complicated by the fact that in some places it was necessary to overcome areas overgrown with dense bushes, and it turned out to be impossible to make observations in some places because of the closeness, building up, and asphalt of part of the territory.

In addition, the area has very intense level of man-made noise. There is a heterogeneous top layer containing a wide variety of inclusions, from conductive sleepers to high resistivity voids that cloud the image of deeper-lying structures. Besides, there is a high level of the electromagnetic field created by power transmission lines and other objects, and limiting the ability to measure weak signals at large distances, corresponding to large exploration depths.

Nevertheless, in the work area, it was possible to obtain VES data of fairly good quality, and to evaluate the features of the geoelectric structure to depths of the first tens of meters. In particular, indigenous clays to the south of the settlement, previously drilled, were identified. A preliminary, probably rather rough stratification of the overlying incision was carried out.

The work was carried out under the program "Paleoclimate, development of the natural environment and long-term forecast of its development" and with the support of grants from RGO-RFBR No. 17-05-41041 and RFBR 18-05-00296.

References:

1. Zinko V.N., Porotov A.V., Myslivets V.I. Development of the relief of the western coast of the Kerch Peninsula in the Late Holocene. "Ecological safety of the coastal and shelf zones and the integrated use of the resources of the shelf". Sevastopol, 2011. Vol. 25, issue 1, pp. 83-95.
2. Zinko V.N., Sergeev K.S., Porotov A.V. Experience in the use of electrical prospecting (ERT) in the study of the Tyritake settlement / // Bosphorus Readings XIX, Kerch, 2018. pp. 162-169.