



## Геофизические исследования при изучении мест захоронений жертв политических репрессий

© А.Г. Дмитриев, А.В. Богданов, А.А. Дмитриев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы использования комплексных геофизических исследований при изучении захоронений на мемориале жертв политических репрессий в районе пос. Пивовариха под Иркутском. В 1989 г. после возбуждения прокуратурой СССР уголовного дела были произведены археологические изыскания методом шурфования по выявлению рвов-накопителей и останков жертв политических репрессий. Всего было обнаружено 4 рва различных размеров, в которых, по оценкам экспертов, могло быть захоронено значительно меньше тел, чем свидетельствуют архивные данные НКВД. В связи с этим для дальнейших изысканий были намечены 3 участка общей площадью свыше 40 кв. км. Учитывая большую площадь, отведенную под первоочередные исследования, в пределах основного мемориала были проведены экспрессные профильные высокоточные магнитометрические и георадиолокационные наблюдения, биолитогеохимическое опробование, а также электрические зондирования методами частотного электромагнитного и вертикального электрического зондирования. Определены эффективность, разрешающая способность и достоверность каждого метода. Сформулированы требования, рациональный комплекс, методика и последовательность проведения исследований, нацеленных на выявление рвов-накопителей. В качестве основных методов широкого спектра действия, которые рекомендуется проводить по всей площади мемориала, предлагаются мобильные, высокопроизводительные ЧЭМЗ и магнитная съемка в градиентометрической модификации. Оба метода выполняются в движении и обеспечивают экспрессное выявление участков переуглублений, а также наличие неглубоко залегающих ферромагнитных материалов. Участки совпадений линейных зон повышенной проводимости в верхней части разреза с локальными магнитными аномалиями определяются под детальные исследования. На выделенных аномалиях по сгущенной сети целесообразно проведение детализационных георадиолокационных и литогеохимических исследований, уточняющих реальные границы и глубину рвов-накопителей. Подобная методика обеспечивает значительное снижение объемов горных работ за счет целенаправленного заложения точечных археологических раскопов.

**Ключевые слова:** история, мемориал, захоронения, жертвы политических репрессий, рвы, геофизика, магнитометрия, электрические зондирования, георадиолокация, литогеохимия, биолитогеохимия

**Благодарности:** авторы выражают благодарность за участие и помощь в проведении работ А.Ю. Ескину (Институт Земной Коры СО РАН), Е.М. Инешину (Иркутский государственный университет) и И.Г. Татькову (Геологический Институт СО РАН).

**Информация о статье:** поступила в редакцию 23 апреля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 12 мая 2020 г.; принята к публикации 1 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Дмитриев А.Г., Богданов А.В., Дмитриев А.А. Геофизические исследования при изучении мест захоронений жертв политических репрессий // *Известия Лаборатории древних технологий*. 2020. Т. 16. № 3. С. 94–111. <https://doi.org/10.21285/2415-8739-2020-3-94-111>

## Geophysical research in the study of burial places of victims of political repression

© Aleksandr G. Dmitriev, Andrei V. Bogdanov, Aleksei A. Dmitriev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The article deals with the use of complex geophysical research in the study of graves at the Memorial of Victims of Political Repression near Irkutsk. In 1989, after a criminal investigation initiated by the USSR Prosecutor's Office, archaeological investigations were carried out using the method of drilling to identify storage ditches and the remains of victims of political repression. In total, 4 ditches of various sizes were found, in which experts estimated that significantly fewer bodies could have been buried than the NKVD archive data indicate. In this regard, 3 plots with a total area of more than 40 square km were planned for further research. Taking into account the large area allocated for primary research, express profile high-precision magnetometric and GPR observations, biolithochemical testing, as well as electric sounding by frequency electromagnetic and vertical electric sounding methods were carried out within the main Memorial. The efficiency, resolution, and reliability of each method are determined. The requirements, rational complex, methodology and sequence of research aimed at identifying burial ditches are formulated. As the main methods of a wide spectrum of actions that are recommended for the entire area of the Memorial, mobile, high-performance FEMZ and magnetic surveys in gradiometric modification are offered. Both methods are performed in motion and provide rapid detection of areas of deepening, as well as the presence of shallow-lying ferromagnetic materials. Areas of coincidence of linear zones of high conductivity in the upper part of the section with local magnetic anomalies are determined for detailed research. On the identified anomalies in the thickened network, it is advisable to conduct detailed GRB and lithogeochemical studies that clarify the real boundaries and depth of the burial ditches. This method provides a significant reduction in the volume of mining operations due to the purposeful laying of point archaeological excavations.

**Keywords:** history, Memorial, burial sites, victims of political repression, moats, Geophysics, magnetometry, electric sounding, GRB, lithogeochemistry, biolithogeochemistry

**Acknowledgements:** The author is grateful for participation and assistance in the work of A.U. Eskin (Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), E.M. Ineshin (Irkutsk State University) and I.G. Tat'kov (Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).

**Article info:** received April 23, 2020; revised May 12, 2020; accepted June 1, 2020.

**For citation:** Dmitriev A.G., Bogdanov A.V., Dmitriev A.A. (2020) Geophysical research in the study of burial places of victims of political repression. *Izvestiya Laboratorii drevnikh tekhnologii = Reports of the Laboratory of Ancient Technologies*. Vol. 16. No. 3. P. 94–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2415-8739-2020-3-94-111>

В 30-х годах прошлого века в пригородах г. Иркутска существовало 2 полигона НКВД – возле д. Разводная и в районе пос. Пивовариха, где производились захоронения жертв политических репрессий. Первый полигон в 1959 г. был затоплен водами Иркутского водохранилища. На втором в 1989 г., после возбуждения прокуратурой СССР уголовного дела, следственной группой областной прокуратуры под руководством следователя по особо важным делам В.А. Ермака и прокурора – криминалиста Н.В. Ерастова были произведены археологические изыскания методом шурфования по выявлению рвов-накопителей и частичному перезахоронению останков жертв политических репрессий. Всего было обнаружено 4 рва различных размеров, в которых по оценкам экспертов могло быть захоронено значительно меньше тел, чем свидетельствуют архивные данные НКВД. В результате работ к дальнейшим изысканиям были намечены 3 участка первой очереди общей площадью

свыше 40 кв. км (рис. 1). В 1990 г. следствие было приостановлено, а работы – прекращены. В 2010 г. при правительстве Иркутской области создается комиссия по восстановлению прав реабилитированных жертв политических репрессий и встает вопрос о продолжении работ по изучению мемориала.

За 75 лет существования полигона – ныне мемориала, ландшафтные условия неоднократно менялись. В 40-х годах на месте захоронений был лес, в 60-х годах картофельное поле, в 70-х – пионерский лагерь. В 90-х годах прошлого века мемориал начинает принимать свой современный вид (рис. 2). В 2019 году принимается проект плана мероприятий по реализации на территории Иркутской области концепции государственной политики по увековечиванию памяти жертв политических репрессий и формированию проекта реконструкции мемориала. В связи с этим на участке «Мемориал», по заказу службы по охране культурного



**Рис. 1. Схема мемориала по работам 1989–1996 годов:** 1 – контуры мемориала; 2 – дороги; 3 – границы леса; 4 – рвы-накопители: выявленные/предполагаемые

**Fig. 1. Diagram of the Memorial for the works of 1989–1996:** 1 – memorial contours; 2 – roads; 3 – forest borders; 4 – storage ditches: identified/suspected

наследия Иркутской области, в пределах выявленных рвов, с целью определения эффективности и выработки рационального комплекса исследований при решении подобных задач были проведены опытно-методические геофизические работы.

Археологическая геофизика (Мартынов, Шер, 1989; Станюкович, 1996) изучает скрытые объекты историко-культурного наследия: археологические артефакты и комплексы, содержащиеся в культурных напластованиях; археологические памятники, утратившие внешние отличительные признаки (могильники, фундаменты несохранившихся сооружений и т. п.). Геофизические методы исследований, в отличие от археологических, являются неразрушающими (Дмитриев, 2015). Актуальность их проведения особенно возрастает при экстренных исследованиях территорий перед застройкой, там, где раскопки не запланированы или по каким-либо причинам затруднены или невозможны. При невозможности проведения раскопок на всей территории в зоне строительства, такая геофизическая информация может оказаться единственным источником знаний. Для изучения археологических объектов могут применяться многие дистанцион-



**Рис. 2. Вид на первый и второй рвы-накопители мемориала**  
**Fig. 2. View of the first and second storage ditches of the Memorial**

ные методы исследований: аэрофотосъемка, лидарометрия; литогеохимическая и инфракрасная съемка; сейморазведка и ядерно-геофизические методы; гравимагнитные и электрометрические исследования (Kozhevnikov, Kharinsky, Snopkov, 2019; Мартынов, Шер, 1989; Станюкович, 1997). Наиболее информативными при выявлении и изучении мест захоронений являются сейсмоакустические (Глазунов, Гоц, Кроль, Самбуев, 1981), частотные электромагнитные зондирования – ЧЭМЗ (Базаров Б.А., Татьков И.Г., Базаров А.Д., 2015), гравитационные съемки (Дмитриев, 2019), а также георадиолокационные зондирования, положительный опыт применения которых достаточно ярко продемонстрирован при изучении захоронений жертв политических репрессий в районе пос. Бутово (Старовойтов, 2008).

Для проведения работ на территории основного мемориала на участке размером около 2500 м<sup>2</sup> была разбита через 5 м топосеть из 9 профилей длиной 48–50 м увязанных двумя магистралями (рис. 3). Начальные и конечные пикеты магистралей были закреплены с помощью GPS. Магнитометрические измерения вдоль профилей осуществлялись по мерной ленте с шагом 1 м, а георадиолокационные измерения и ЧЭМЗ осуществлялись непрерывно в движении с привязкой на точках пересечения с магистралями.

Магнитометрические работы проводились в 2 этапа. Первоначально цифровым магнитометром «GSM-19» были изучены вариации магнитного поля. Как показали измерения (рис. 4), за счет помех преимущественно промышленного происхождения, колеблемость магнитного поля превышала 200 нТл. При этом имели место как высоко градиентные, так и плавно изменяющиеся вариации. Причиной такой изменчивости поля является работа радиолокатора ближнего привода аэропорта Иркутск, прохождение на малой высоте над мемориалом самолетов при взлете и посадке, а также линии ЛЭП.

В связи с высоким уровнем помех были сформированы две петромагнитные модели объекта исследований. Первая – котлован рва в виде полуцилиндра радиусом 3 м. Полуцилиндр переотло-

женных рыхлых отложений и вмещающий неизменные грунты характеризуется практически одинаковой, от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $40 \cdot 10^{-6}$  ед. СГС магнитной восприимчивостью (Физические свойства горных пород..., 1976), но различной намагниченностью, поскольку намагниченность небольших доменов в результате перемещений грунта имеет различную направленность и в сумме стремится к нулю. Теоретические расчеты показывают, что подобная дифференциация обеспечивает уменьшение полного вектора магнитного поля  $T_a$  на 0.03–0.05 нТл (Зинченко, 2005). Однако в условиях интенсивных промышленных помех и существующей аппаратурной погрешности подобные аномалии не позволяют в явном виде выделять рвы по данным магнитометрии.

Вторая модель аппроксимирует скопления ферромагнитных материалов, находящихся на небольшой глубине, обусловленных наличием определенного количества металлических предметов: посуда, гвозди, пряжки от ремней, пуговицы, металлические зубные протезы, значки и т. п. Теоретические расчеты показывают, что аномалии полного вектора магнитного поля  $T_a$  от шара диаметром до 5 см, залегающего на глубине 1 м, составляет 0,09 нТл.

В связи с этим для достижения требуемой точности, измерения пришлось проводить с учетом введения поправок за вариации путем их регистрации вторым магнитометром «Минимаг». Однако отсутствие взаимной синхронизации приборов через GPS позволило добиться погрешности измерения полного вектора магнитного поля  $T_a$  только в 1,2 нТл, чего явно недостаточно для решения поставленных задач. Несмотря на это, в пределах полигона выявлен ряд цепочечных мозаичных аномалий, имеющих пространственное совпадение с контурами рвов-накопителей (рис. 5). Вероятней всего, это мультипликативные аномалии, обусловленные наличием групп металлических предметов или предметов, находящихся на глубине менее метра, т. е. непосредственно в подпочвенном слое.

По данным бурения, проведенного ВостСибТИСИЗом на территории аэропорта, в верхней части разреза наблюдается однородная толща элю-

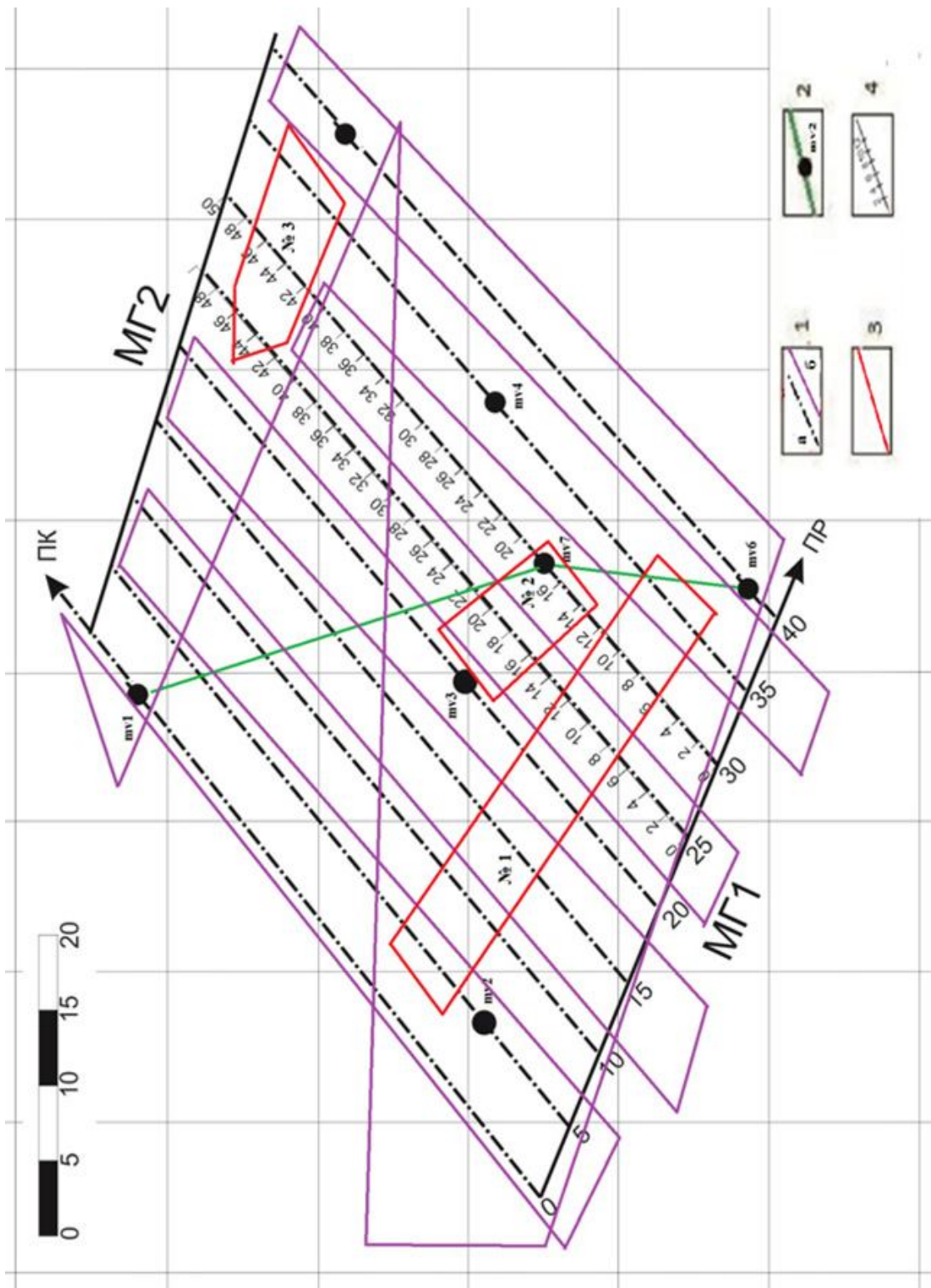
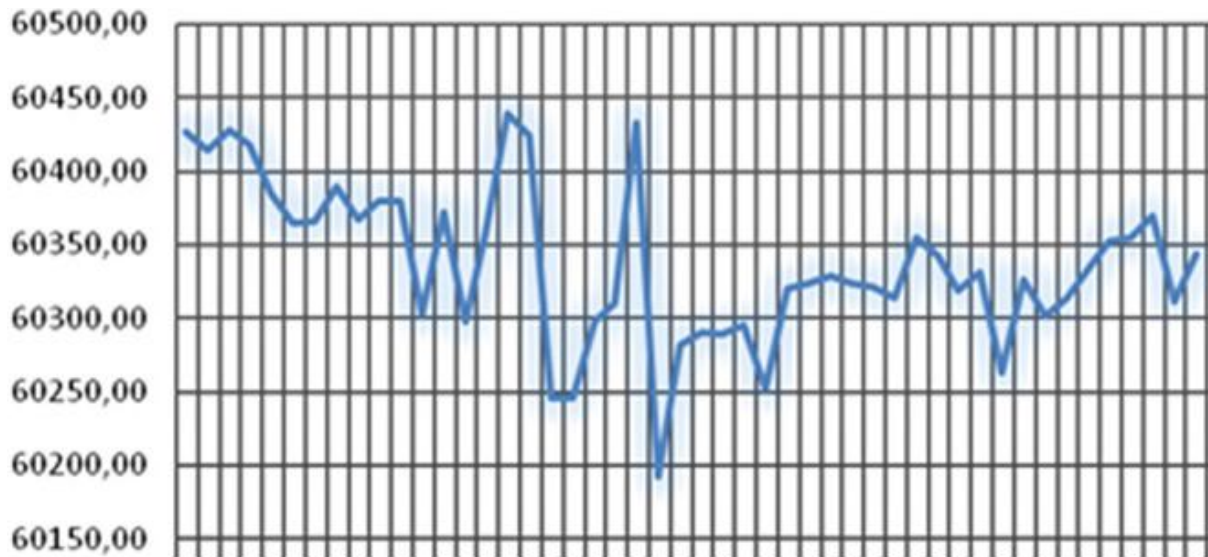


Рис. 3. Схема расположения рвов-накопителей и геофизических профилей: 1 – профили: а – магниторазведочные, б – ЧЭМЗ; 2 – точки, их номера и профиль ВЭЗ; 3 – контуры рвов-накопителей и их номера; 4 – профили и пикеты отбора литогеохимических проб

Fig. 3. Layout of storage ditches and geophysical profiles: 1 – profiles: а – magnetic exploration, б – FEMZ; 2 – points, their numbers and the profile of the VEZ; 3 – contours of storage ditches and their numbers; 4 – profiles and pickets of lithogeochemical sampling



*Рис. 4. Вариации магнитного поля  $T_a$  в районе мемориала*  
*Fig. 4. Variations of magnetic field  $T_a$  in the area of the Memorial*

виальных легких песчаных просадочных суглинков – лёссов при глубине залегания уровня грунтовых вод 10–12 метров. По измерениям на образцах суглинки при естественной влажности характеризуются высокой пластичностью и пониженными до 17–19 Ом·м, значениями удельного электрического сопротивления и, как следствие, высокой диэлектрической проницаемостью.

Вертикальные электрические зондирования были проведены с использованием регистратора «Электротест» в семи точках в пределах основного полигона микроустановкой Венера с максимальными полуразносами АВ/2 – 40 м. Обработка осуществлялась в программной среде IPI-2VIN (рис. 6). Разрез низкоомный, все кривые имеют ярко выраженный трехслойный характер и свидетельствуют о субгоризонтальном залегании пород. Опорный горизонт сопротивлением 850–1000 Ом·м залегает на глубине 15–20 м и, вероятно, обусловлен коренными песчаниками черемховской свиты. Выше залегают песчано-глинистые рыхлые отложения повышенной проводимости. Перекрывает их почвенно-растительный слой мощностью до 0,3 м, сопротивление которого определяется погодными условиями. Однако чувствительности и разрешающей способности методу ВЭЗ в данной модификации явно не хватает для решения поставленных задач. В связи с этим данные ВЭЗ в основном ис-

пользовались при интерпретации данных ЧЭМЗ и георадиолокации для введения масштабирующих поправок.

Аппаратурно-программный комплекс «Немфис», работающий по методу индукционного частотного электромагнитного зондирования (ЧЭМЗ), обеспечивает высокую производительность благодаря возможности изучения геоэлектрических особенностей разреза в движении (Базаров Б.А., Татков И.Г., Базаров А.Д., 2015). Метод наиболее эффективен при изучении верхней части геологического разреза в условиях повышенной глинистости. При инженерно-геологических изысканиях основными объектами ЧЭМЗ являются приповерхностные проводящие геологические неоднородности, связанные с определением морфологии погребенного рельефа, литологическое расчленение разреза и разбраковка приповерхностных аномальных объектов.

При проведении работ ЧЭМЗ для изучения целевых глубин от 1 до 8 метров, использовался набор испускаемых источником электромагнитных импульсов на 14 частотах от 2,5 до 250 кГц, регистрируемых на 2-х приемниках с одновременной фазовой селекцией сигнала. В пределах мемориала были выполнены площадные (см. рис. 3) зондирования в режиме непрерывной записи с регистрацией GPS метки координат. Обработка данных

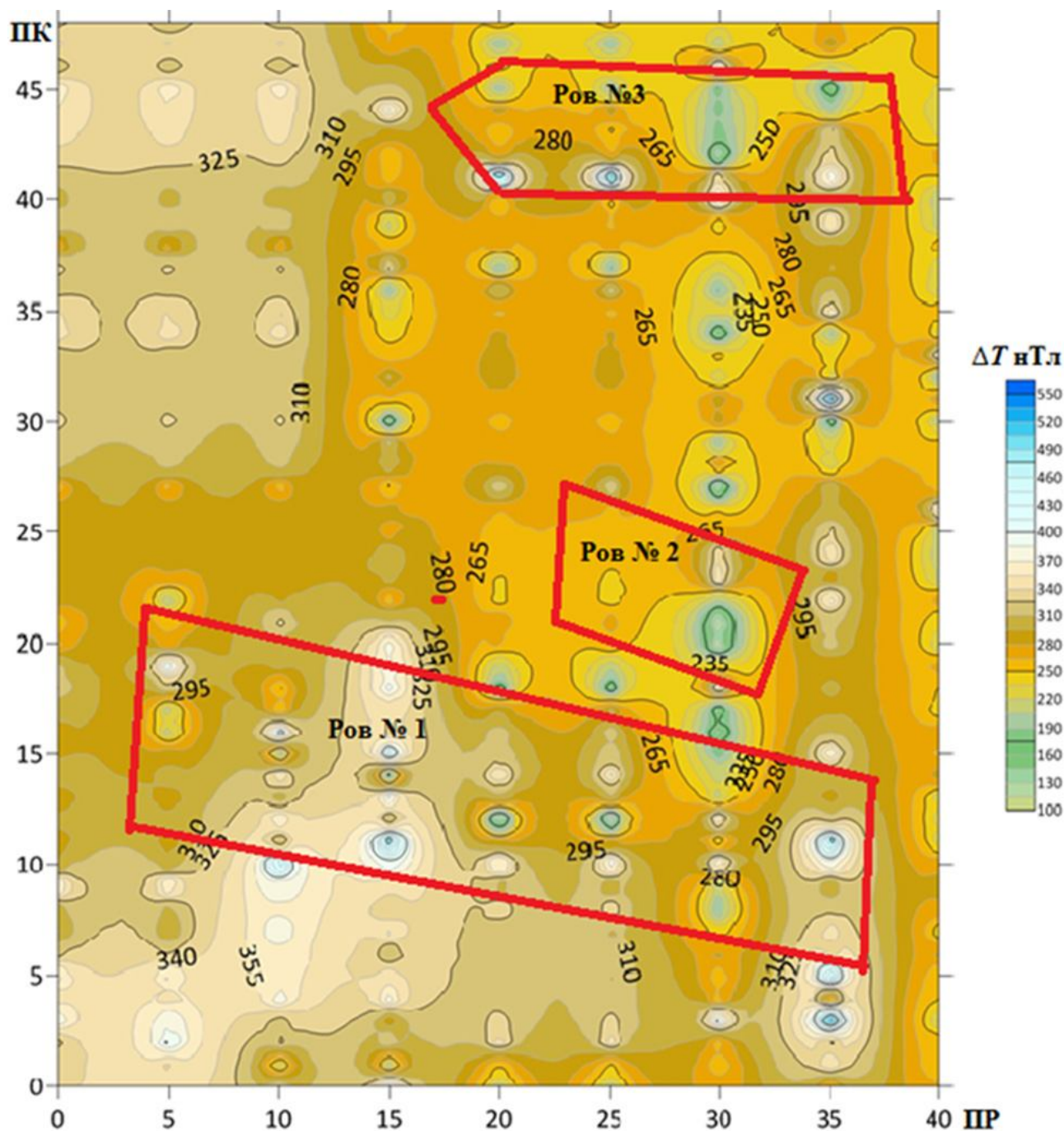


Рис. 5. План изодинам приращений полного вектора магнитного поля  $\Delta T$   
 Fig. 5. Plan of isodynamic increments of the full magnetic field vector  $\Delta T$

проводилась в программе Nemfis-1D. Программа предназначена для одномерной интерпретации данных, полученных с аппаратурой Немфис. Благодаря простоте и гибкости интерфейса, высокой скорости работы, программа позволяет быстро и эффективно визуализировать с учетом геометрии измерений результаты как профильных, так и пло-

щадных измерений. Особенностью метода является необходимость для снижения вариативности результатов исследований привязки результатов ЧЭМЗ по глубине. Для этого необходимо использовать данные ВЭЗ и георадиолокации. По результатам работ были построены разрезы и объемные модели эффективного сопротивления (рис. 7). При-

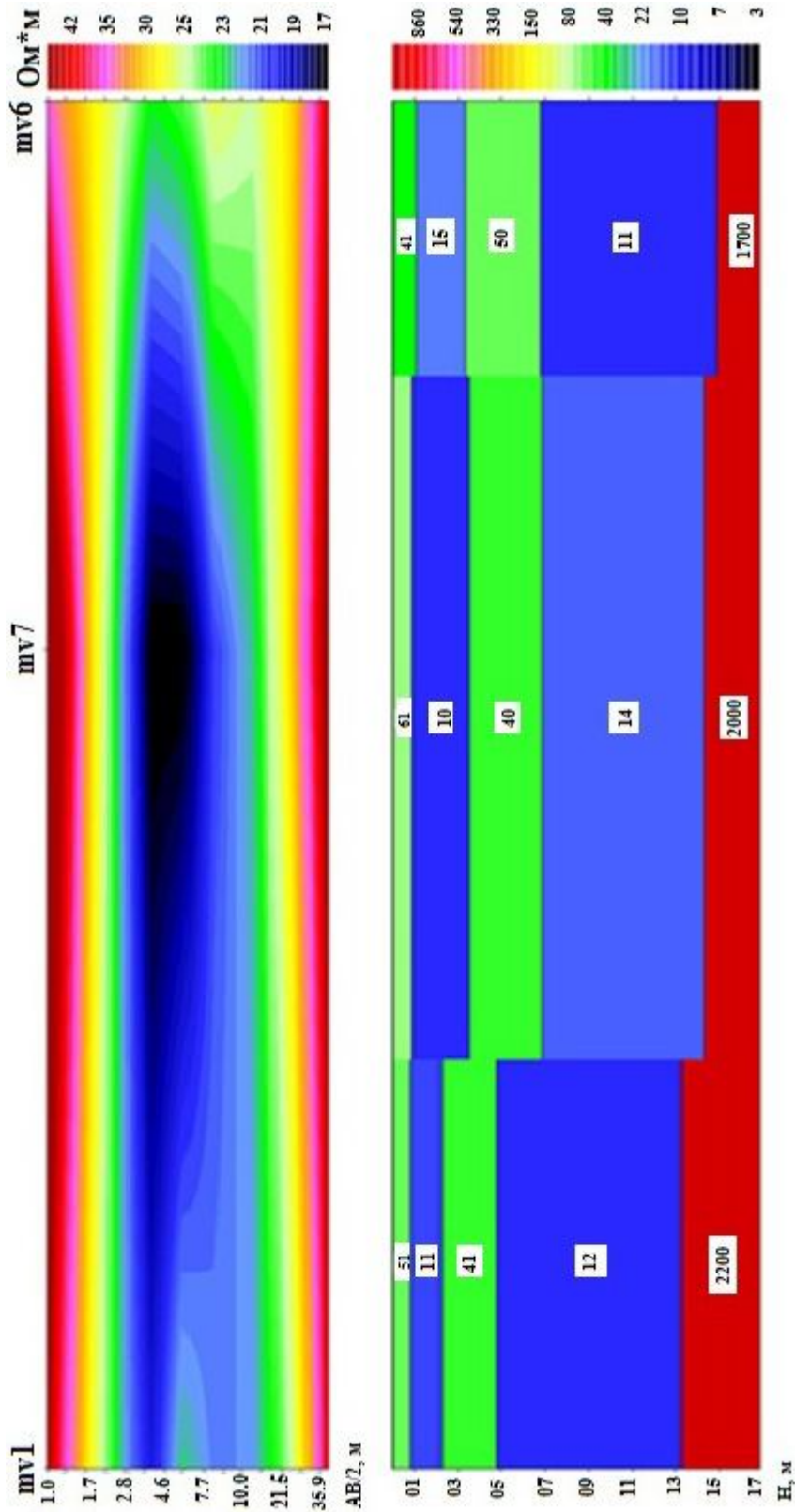


Рис. 6. Разрез изоом  $\rho_k$  и геозлектрический разрез по методу ВЭЗ  
 Fig. 6. Cut isoом  $\rho_k$  and geoelectric section along VES method



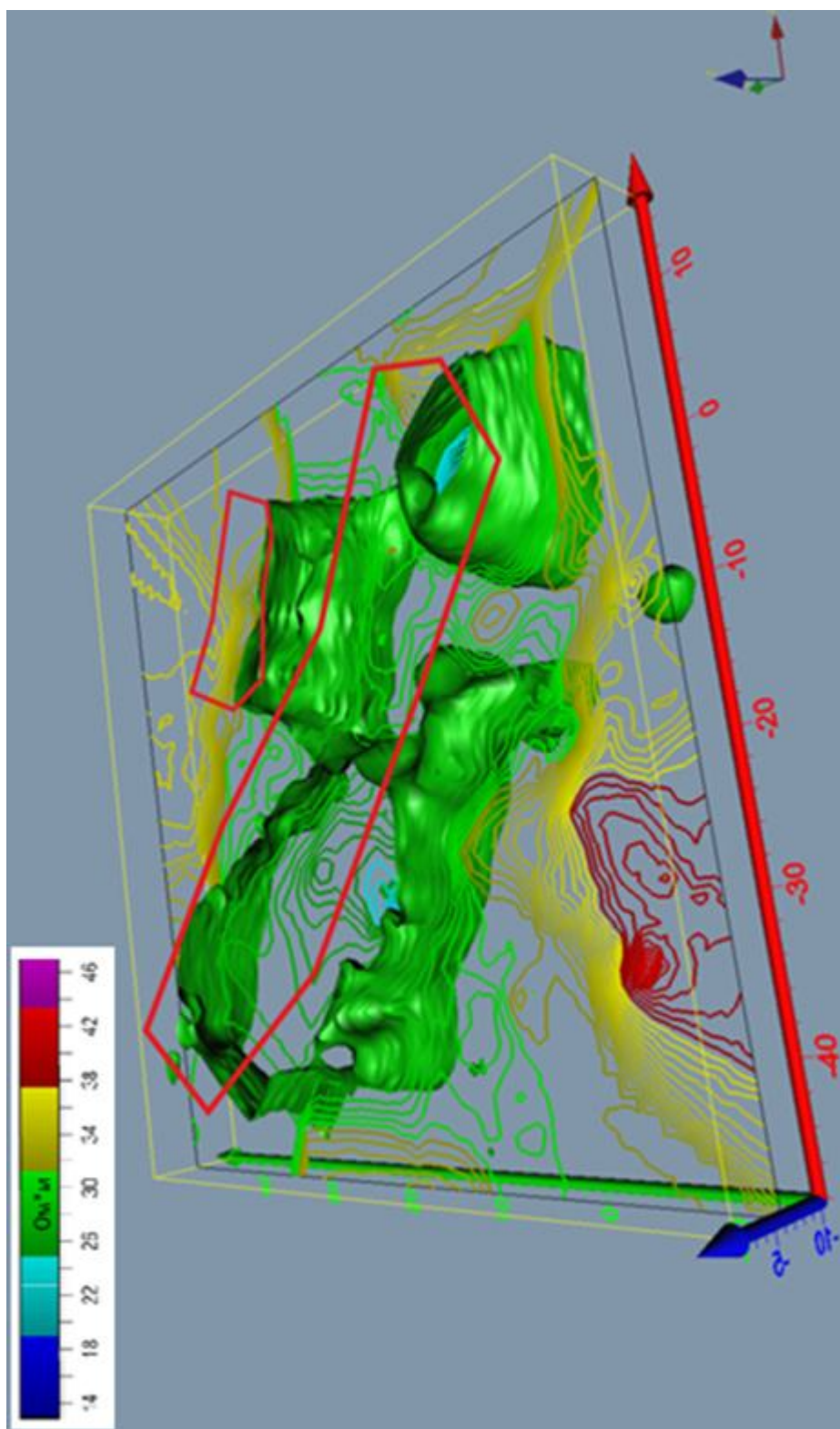


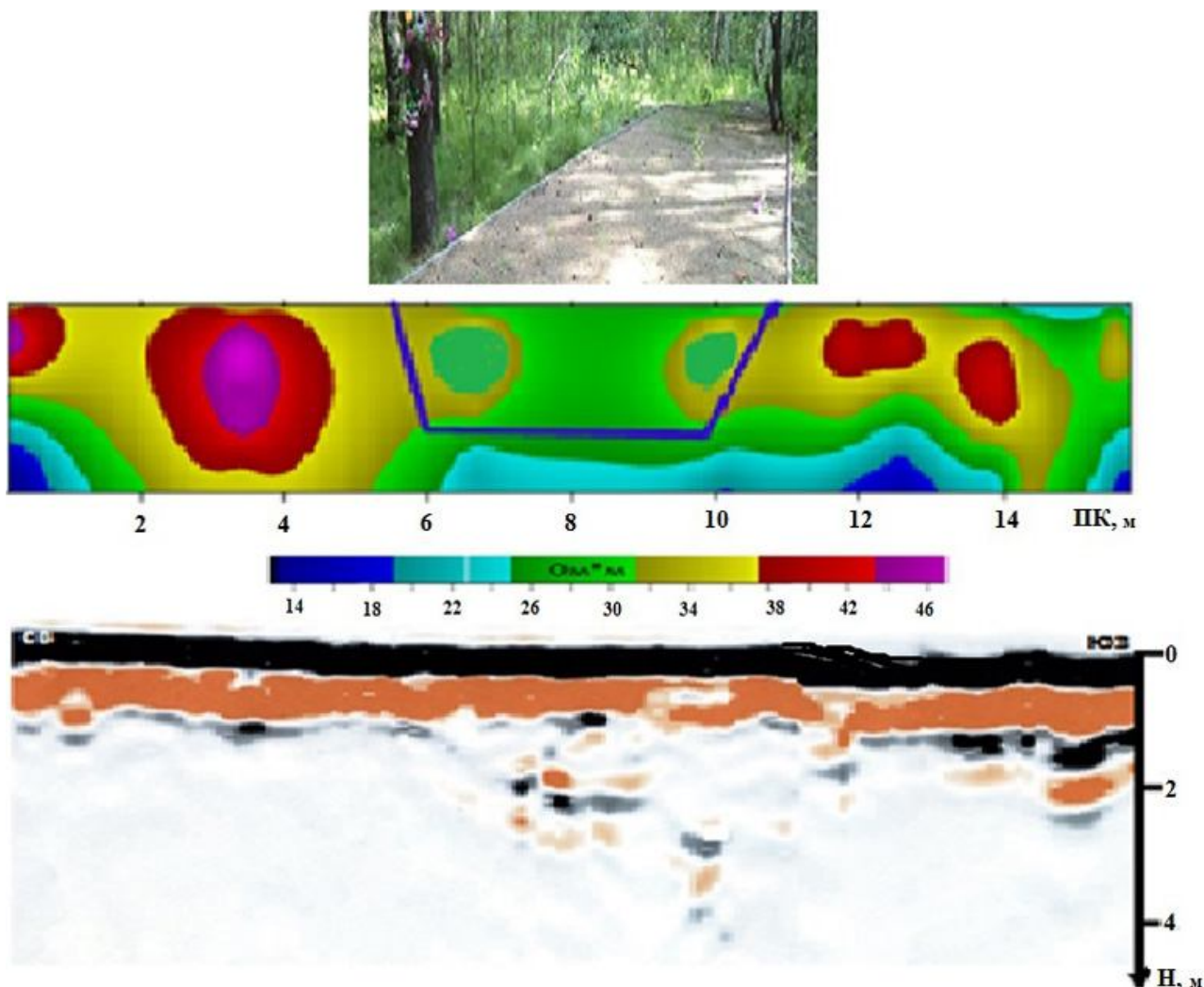
Рис. 7. Объемная модель эффективных сопротивлений  $\rho_{эф}$  ЧЭМЗ центральной части мемориала  
Fig. 7. Three-dimensional model of the effective resistance  $\rho_{эф}$  of FEMZ central part of the Memorial

менение ЧЭМЗ позволило выявить различия по проводимости между ненарушенными и переотложенными грунтами. Аномалий, непосредственно связанных с захоронениями, не обнаружено. Основным критерием поисков является относительное уменьшение значений кажущегося сопротивления в пределах рвов-накопителей, связанное с изменением консистенции грунтов при их перемещении. Поскольку рвы проходились взрывным способом, потом заполнялись телами и засыпались грунтом, естественно, что их очертания по данным георадиолокации и ЧЭМЗ не совпадают с ныне существующими (см. рис. 2; рис. 7) прямолинейными контурами ограждений рвов. Следует отметить, что интерфейс трехмерного изображения материалов ЧЭМЗ в программе Nemfis-1D не очень корректен и может использоваться только в качестве иллюстративной графики, но ни в коем случае, как отчетные цифровые материалы. В связи с этим для трансформации данных ЧЭМЗ в количественные характеристики частотные зондирования необходимо комплексировать с георадиолокацией.

Георадиолокационные измерения были проведены по 9 продольным и 1 связующему профилям в пределах основной площади мемориала (см. рис. 3) и ряду профилей через ров № 4 георадиолокатором ОКО-2 с антенной 250 МГц при синхронизации зондирующих импульсов с помощью мерного колеса диаметром 213 мм. Обработка радарограмм осуществлялась в формате обрабатывающей системы «GeoScan-32». Обработка включала традиционные процедуры: редактирование, программную и мгновенную регулировку амплитуд, полосовую фильтрацию и деконволюцию (Старовойтов, 2008). Это позволило обеспечить глубину исследований 3–5 м. Практически на всех радарограммах с различной степенью контрастности выделяются переуглубления, обусловленные рвами. Переуглубления имеют различную выраженность и конфигурацию, что обусловлено разной степенью сохранности и изменениями формы рвов со временем. Следует отметить практически идеальные поверхностные условия для проведения георадиолокационных работ (см. рис. 2): ровный рельеф, отсутствие подземных (корни, валуны,

коммуникации и т. п.) и надземных (деревья, строения) помех. Единственной сложностью являлись высокие значения диэлектрической проницаемости и проводимости пород верхней части разреза, что вело к аномальной интенсивности затухания сигналов и снижению эффективности ГРЛЗ. Кроме того, однородность поверхностных отложений и отсутствие маркирующих отражающих горизонтов затрудняет выявление зон нарушения корреляции, которые являются основным диагностическим признаком изменений в рыхлых отложениях. Несмотря на это, особенно четко переуглубление фиксируется на поперечном профиле в пределах рва № 4. Это обусловлено большой (6 метров) шириной и глубиной рва, а также наличием на поверхности высокоомной насыпной щебенки. По результатам ЧЭМЗ, в разрезе изом  $\rho_{эф}$  так же выделена зона повышенной, относительно вмещающей толщи проводимости, которая однозначно коррелируется с поверхностными контурами рва и данными георадиолокации (рис. 8).

Однако, несмотря на всю представительность комплексных геофизических исследований, они всё-таки являются косвенными. В связи с этим были проведены опытные литохимические исследования. Данный метод предназначен для выявления ореолов рассеяния химических элементов, типоморфных минеральных новообразований, а также зон развития аномальных значений физико-химических параметров среды и физических свойств пород, обусловленных естественной миграцией химических элементов и их соединений (Перельман, 1965). Метод реализуется путем отбора и исследования проб пород, грунтов, почв и растительности с применением методов физико-химических, ядерно-физических, спектрофотометрических и других видов анализа вещественного состава и физических свойств горных пород. Литохимические исследования применяются на региональном, поисковом и разведочном этапах геологоразведочных работ на различные виды полезных ископаемых и осуществляются в виде мелко-, средне- и крупномасштабных съемок, нацеленных на выявление и подготовку объектов к поисковому бурению (Левинсон, 1976).



**Рис. 8. Разрез изом  $\rho_{эф}$  по ЧЭМЗ (а) и георадиолокационный (б) разрез по профилю через ров № 4**  
**Fig. 8. Cut izoom  $\rho_{эф}$  by FEMZ (a) and GPR (b) split the profile across the ditch No 4**

В последние годы рядом исследователей интенсифицировались применения литогеохимии при изучении захоронений. В качестве основного индикатора наличия захоронений практически всеми исследователями используется фосфор. В России метод фосфатного анализа начал применяться при почвенных исследованиях еще в 30-х годах прошлого века (Штобе, 1959). Конкретные результаты эффективности фосфатного анализа были получены при изучении древних поселений на территории Псковской области (Микляев, Герасимова, 1968), а так же могильника второй Камчатской экспедиции Беринга (Станюкович, 1994)<sup>1</sup>. При этом

все исследователи связывали повышение содержания фосфора с окультуриванием почв.

Несколько иную точку зрения имеют зарубежные ученые, которые считают причиной повышения содержания фосфора костные остатки. В лаборатории Британского Национального музея содержание фосфора определялось в почвах ряда шотландских могильных археологических памятников, где не было видимых телесных останков или человеческой деятельности. По существу, метод заключается в определении содержания фосфора в почвах археологически значимых объектов и сравне-

<sup>1</sup> Станюкович А.К. Открытие могильника второй Камчатской экспедиции Беринга методом фосфатного анализа

грунта // Международная конференция по применению методов естественных наук в археологии. Сб. тез. докл. СПб., 1994. Ч. II. С. 174–175.

ние их с фоновыми контрольными образцами (McCawley, Kerrell, 1971).

Фосфор в составе живых организмов относится к разряду макроэлементов со средним содержанием 0,7, при кларковом содержании в земной коре 0,12 вес. % (12мг/кг). При этом фосфор характеризуется чрезвычайно высоким энергетическим коэффициентом биологического накопления, что обеспечивает формирование так называемых биогеохимических ореолов рассеяния. На поверхности почвы фосфорсодержащие минералы подвержены атмосферным воздействиям и воздействию микроорганизмов, что приводит к выбросу фосфора, главным образом в виде ортофосфатов ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ;  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ; и др.), которые могут вымываться, либо поглощаться растениями. Последний фактор не приводит к безвозвратной потере, так как мертвые растения его отдают и с опадающей листвой и стеблями фосфор возвращается обратно в почву. Содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  в песчано-глинистых породах довольно постоянно и колеблется в пределах от 0,08 до 0,17 вес. % (Войткевич, Мирошников, Поваренных, 1970). Более высокие концентрации на поверхности обычно связаны с человеческой деятельностью. В основном фосфор поступает в почвы:

- из костных останков захоронений;
- с мочой и фекалиями человека и животных вокруг жилья;
- от пищевого мусора;
- из фосфора на основе химических веществ, используемых в качестве удобрений и современных чистящих средств.

Костная ткань представляет собой поликристаллический материал, состоящий из неорганических и органических компонентов. Неорганическая фракция, составляя примерно три четверти кости и свыше 90 % зубной эмали, состоит в основном из фосфор-содержащего минерального гидроксиапатита –  $\text{K}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Органический материал костей, ткани плоти и т. п., содержит фосфора значительно меньше, поэтому основным источником фосфатов в погребениях являются скелетные кости. По данным W.R.Fernan – из 630 г фосфора, содержащегося в теле 11 человек, 80 % находилось в скелете (Fearon, 1948).

Исследования Британских ученых (Holliday, Gartner, 2007) свидетельствуют, что фосфаты сохраняются в большинстве почв. Прочные нерастворимые соединения, имеющие ограниченную подвижность, быстро связываются со многими почвенными компонентами и формируют устойчивые вторичные ореолы рассеяния. Количество фосфора зависит от типа почвы, ее кислотности, температуры, наличия влаги, концентрации таких элементов как железо, алюминий и кальций, а также от времени, прошедшего с момента захоронения. На рисунке 9 приведены результаты литогеохимического опробования на ряде захоронений Шотландии. В районе первых трех захоронений концентрации фосфора в несколько раз выше фоновых. В четвертом, несмотря на наличие костных остатков, контрольные значения соизмеримы, либо даже превышают фоновые концентрации в контрольных пробах (McCawley, Kerrell, 1971). Это может быть связано либо с обширной доисторической или, что более вероятно, с современными загрязнениями (скот, моющие средства, фосфатные удобрения и т. д.). Это привело к стиранию различий, которые следовало бы ожидать.

Для оценки возможностей литогеохимического метода при выявлении современных захоронений было произведено опробование с последующим определением методом рентгенофлуорисцентного анализа содержания оксида фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) в приповерхностных песчано-глинистых элювиальных отложениях. Подобные исследования широко применяются при изучении древних могильников (Holliday, Gartner, 2007), однако для выявления объектов возраста, подобного захоронениям в пределах мемориала, литогеохимические исследования не использовались.

Работы были проведены по профилям № 25 и 30, которые пересекали рвы № 1, 2 и 3 (см. рис. 3). Пробы навеской 50–70 г отбирались с шагом 2 м пробоотборником из подпочвенного слоя, потом сушились, просеивались на миллиметровом сите, а затем измельчались и прессовались в таблетки диаметром 15 мм и толщиной 10 мм. Всего было отобрано 100 проб. Анализ химического состава определялся на рентгено-флуорисцентном анали-

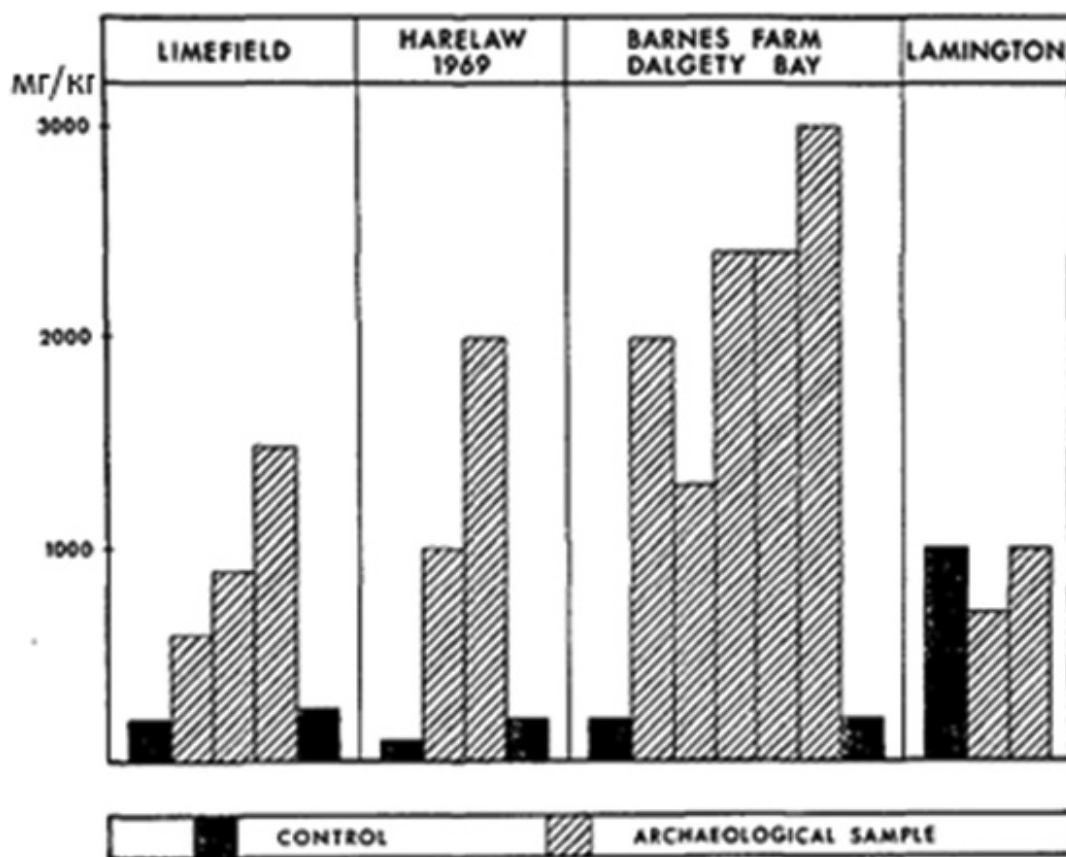


Рис. 9. Гистограммы содержания фосфора в пробах почв в Шотландских захоронениях (McCawley, Kerrell, 1971)  
 Fig. 9. Histograms of phosphorus in soil samples in Scottish graves (McCawley, Kerrell, 1971)

заторе «Спектроскан МАКС – GV», который обеспечивает погрешность измерений 1,8 %. В пределах 4-го рва, засыпанного слоем современной щебенки толщиной 30–40 см, которая предотвратила образование ореолов рассеяния, пробы отобрать не удалось. Результаты литогеохимических работ по профилю № 30 приведены на рисунке 10.

При фоновых содержаниях 20–30 мг/кг (0,2–0,3 вес. %) в пределах всех трех рвов на обоих профилях наблюдается 5–8 кратное увеличение концентрации  $P_2O_5$  (мг/кг), что подтверждает тесную взаимосвязь фосфора с захоронениями (рис. 10). Однако концентрация  $P_2O_5$  в пределах аномалий в районе мемориала почти на порядок меньше чем в Шотландских захоронениях (см. рис. 9). Вероятней всего это обусловлено значительно меньшим возрастом захоронений и неоднократными изменениями почвенно-растительного слоя территории, что естественно замедляло накопление фосфора и формирование полноценных вторичных ореолов рассеяния.

Дополнительно все пробы были проанализированы на концентрации некоторых тяжелых металлов:  $Fe_2O_3$ , Zn, Pb, Cu. Результаты анализов свидетельствуют об отсутствии каких-либо связей между Zn, Pb, Cu и захоронениями. В то же время содержание  $Fe_2O_3$  практически однозначно (коэффициент корреляции 0,89) коррелируется с концентрацией фосфора (см. рис. 10). Причины такого парагенезиса требуют дальнейших исследований.

Высокая стоимость анализов при большом объеме проб затрудняет широкое внедрение литогеохимического опробования. В связи с этим была сделана попытка определения возможностей биогеохимического метода, поскольку корневая система деревьев обеспечивает сбор фосфатов со значительно большей площади, чем единичная проба. На первом этапе для определения возраста деревьев в пределах мемориала и оценки возможностей биогеохимического метода было проведено дендрохронологическое опробование 10 деревьев, находящихся в непосредственной близости от рвов

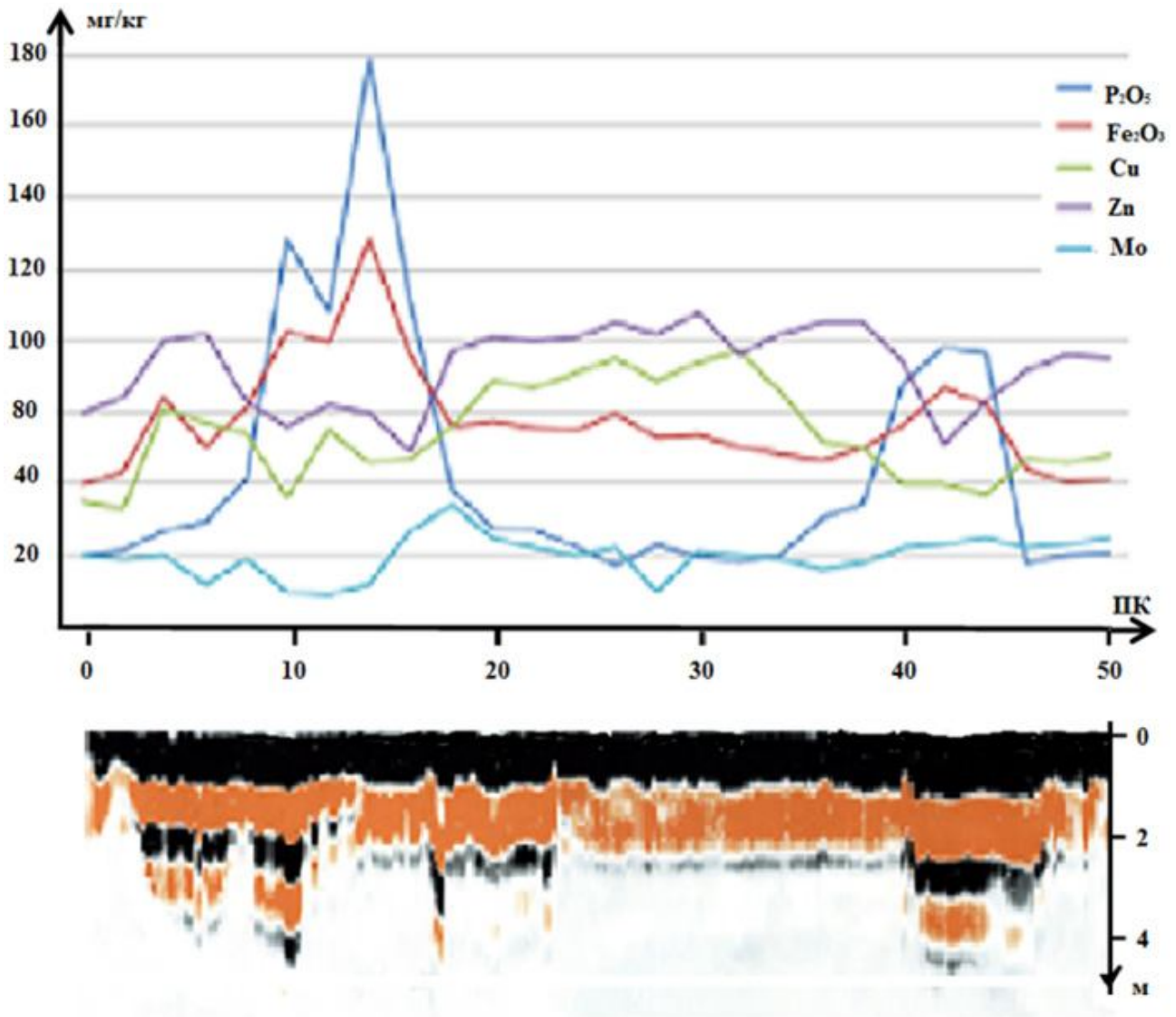


Рис. 10. Результаты литогеохимического опробования и георадиолокации по профилю 30  
Fig. 10. The results of lithochemical sampling and GPR profile 30

(рис. 11). Измерения концентрации фосфора осуществлялись методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, который основан на переводе элементов из твердых объектов в раствор смесью сильных кислот и окислителей с последующим измерением интенсивности спектральной линии излучения атома определяемого элемента, переведенного в возбужденное состояние (Количественный химический анализ почв, 1998)<sup>2</sup>. Ин-

<sup>2</sup> Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. – 126 с.

тенсивность излучения зависит от значения массовой концентрации элемента в растворе анализируемой пробы. В высокочастотную индуктивно-связанную аргоновую плазму, поддерживаемую в горелке при атмосферном давлении, при помощи перистальтического насоса вводится жидкая проба в аэрозольном состоянии. В плазменном факеле горелки происходит полное испарение микрокапель аэрозоля и термическая диссоциация вещества пробы на молекулы и атомы. Возбуждение и ионизация атомов весьма глубокие и для большинства элементов оказываются близки к 100 %. После 2–3 мс нахождения в плазме атомы или мо-



**Рис. 11. Отбор проб в непосредственной близости от рва № 4 и дендрохронологические пробы**  
**Fig. 11. Samples in the vicinity of the ditch No 4 and dendrochronological samples**

лекулы при переходе из возбужденного в основное состояние излучают свет на длине волны, характерной для определяемого элемента. Этот эффект и используется в методе атомно-эмиссионной спектроскопии.

Навеска анализируемой растительности пробы (см. рис. 11) в воздушно-сухом, однородном и измельченном состоянии массой 1,0–2,0 г помещалась в стакан, заливалась 20 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты, перемешивалась и, избегая бурного кипения, постепенно нагревалась до температуры 95 °С. При уменьшении объема пробы до 10 см<sup>3</sup> – проба охлаждалась, добавлялось 2 см<sup>3</sup> 33 %-ной перекиси водорода, а затем снова нагревалась до состояния «влажных солей». После охлаждения к пробе добавлялось 5 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты и около 20 см<sup>3</sup> бидистиллированной или деионизированной воды. Затем раствор выщелачивался при слабом нагревании до растворения солей. После охлаждения анализируемый раствор доводился бидистиллированной или деионизированной водой до объема 100 см<sup>3</sup>. Далее расчет массовой концентрации определяемых элементов проводился при помощи

программного обеспечения прибора на основании его градуировочной характеристики.

Отбор и анализ дендрохронологических проб показывал, что несмотря на большой диаметр (см. рис. 2; 11), возраст всех деревьев колеблется от 27 до 48 лет. Это свидетельствует о том, что они выросли значительно позднее проведения захоронений. Несмотря на это практически во всех пробах отмечается повышенное, до 340 мг/кг (3,4 вес. %) содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при фоновых концентрациях не превышающих 15 мг/кг (0,15 вес. %). Следует отметить выявленную зональность распределения фосфора по диаметру стволов деревьев. Максимальные, до 813 мг/кг (8,13 вес. %), концентрации P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, отмечаются во внешней, подкоровой части древесины, при постепенном снижении до 20–25 мг/кг к центральной части стволов.

Несмотря на столь сложную, на первый взгляд, методику, производительность данного способа, по сравнению с колориметрическим методом, использовавшимся при изучении древних поселений в Псковской области (Микляев, Герасимова, 1968), почти в 30 раз выше и достигает 200 проб в смену. Это позволяет использовать данный

метод в промышленных масштабах, особенно при изучении геохимических особенностей территорий по потокам рассеяния, особенно в залесённой местности. Однако не следует забывать, что локальность биолитогеохимического метода значительно ниже точечного литогеохимического опробования.

Результаты опытных геофизических работ позволяют сформулировать основные элементы методики, рациональный комплекс (Комплексирование методов ..., 1984) и последовательность геофизических исследований при изучении захоронений жертв политических репрессий. В качестве основных методов широкого спектра действия, которые рекомендуется проводить по всей площади мемориала, предлагаются мобильные, высокопроизводительные ЧЭМЗ и магнитная съёмка, желательна в градиентометрическом варианте. Градиентометрия характеризуется более высокой производительностью, значительно большей информативностью и высокой помехоустойчивостью. При использовании градиентометрии возможна регистрация

сразу 5 параметров магнитного поля. При этом погрешность градиентометрической магнитометрии не превышает 0,03 нТл. Оба метода могут выполняться в движении с расстоянием между профилями не более 5 метров, что обеспечит 100 % выявление переуглублений шириной свыше 5 м, а также наличие неглубоко залегающих ферромагнитных материалов в полосе 2–2,5 м.

Недостатком ЧЭМЗ и градиентометрии является невозможность количественной обработки и интерпретации данных. Поэтому выделенные на этапе качественной интерпретации участки совпадений линейных зон повышенной проводимости в верхней части разреза с локальными магнитными аномалиями определяются под детальные исследования. На выделенных аномалиях по сгущенной сети 2 × 2 м целесообразно проведение детализационных георадиолокационных и, в случае глубокого – свыше 1,5 м захоронения тел – литогеохимических исследований, уточняющих реальные природу, границы и глубину рвов-накопителей.

#### Библиографический список

Базаров Б.А., Татьков И.Г., Базаров А.Д. Применение методов геофизической разведки в археологии: опыт опережающего изучения памятников Хуннской культуры Забайкалья // Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культура. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. С. 47–57.

Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1970. 280 с.

Глазунов В.В., Гоц И.А., Кроль Б.И., Самбуев Б.С. Методика поиска склепов Херсонесского некрополя с помощью сейсморазведки // Региональная геология некоторых районов СССР. М., 1981. Вып. 5. С. 93–99.

Дмитриев А.А. Применение георадиолокационных технологий при решении археологических задач // Вестник Иркутского государственного технического университета. Иркутск. 2015. № 7. С. 12–18.

Дмитриев А.Г. Геофизическое обеспечение археологического обследования территории бывшего лютеранского кладбища в г. Иркутске // Известия Лаборатории древних технологий, 2019. Т. 15. № 3. С. 103–114.

Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно геологической интерпретации

#### References

Bazarov B.A., Tat'kov I.G., Bazarov A.D. (2015) The use of geophysical exploration methods in archeology: the experience of the advance study of the Hunnu Culture sites of Transbaikalia. *Evraziya v kainozoe. Stratigrafiya, paleoekologiya, kul'tura = Eurasia in the Cenozoic. Stratigraphy, paleoecology, culture*. Irkutsk: Irkutsk State University. P. 47–57. (In Russ.)

Voitkevich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S. (1970) *Geochemistry Quick Reference*. Moscow: Nedra. 280 p. (In Russ.)

Glazunov V.V., Gots I.A., Krol' B.I., Sambuev B.S. (1981) A technique for searching for the crypts of the Kherson necropolis using seismic exploration. *Regional'naya geologiya nekotorykh raionov SSSR = Regional Geology of Some Areas of the USSR*. Moscow. Iss. 5. P. 93–99. (In Russ.)

Dmitriev A.A. (2015) The use of georadar technologies in solving archaeological problems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. Irkutsk. No. 7. P. 12–18. (In Russ.)

Dmitriev A.G. (2019) Geophysical support of the archaeological survey of the territory of the former Lutheran cemetery in the city of Irkutsk. *Izvestiya laboratorii drevnikh tekhnologii = Journal of the Laboratory of Ancient Technologies*. Vol. 15. No. 3. P. 103–114. (In Russ.)

Zinchenko V.S. (2005) Petrophysical fundamentals of hydrogeological and engineering geological interpretation



геофизических данных. М.: Изд-во АИС, 2005. 392 с.

Комплексирующие методы разведочной геофизики. М.: Недра, 1984. 365 с.

Левинсон А.Ф. Введение в поисковую геохимию. М.: Мир, 1976. 500 с.

Мартынов А.И., Шер Я.А. Методы археологического исследования. М.: Высшая школа, 1989. 223 с.

Микляев А.М., Герасимова Н.Г. Опыт применения метода фосфатного анализа при разведке древних поселений на территории Псковской области // Советская археология. 1968. № 3. С. 251–254.

Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. М.: Недра, 1965. 272 с.

Станюкович А.К. Археологическая геофизика в России // Геофизика. 1996. № 2. С. 57–64.

Станюкович А.К. Основные методы полевой археологической геофизики // Естественно-научные методы в полевой археологии. 1997. Вып. 1. С. 19–42.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М.: Недра, 1976. 527 с.

Штобе Г.Г. Применение метода почвенных исследований в археологии // Советская археология. 1959. № 4. С. 135–139.

Fearon, W.R. An Introduction to Biochemistry, William Heinemanns Medical Books Ltd., 1948, pp. 569.

Holliday, VT & Gartner, WG 2007, 'Methods of soil P analysis in archaeology', *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, no. 2, pp. 301-333. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.05.004>

Kozhevnikov, N.O., Kharinsky, A.V., Snopkov, S.V. Geophysical prospection and archaeological excavation of ancient iron smelting sites in the Barun-Khal valley on the western shore of Lake Baikal (Olkhon region, Siberia). *Archaeological Prospection*. 2019; 26: 103–119. <https://doi.org/10.1002/arp.1727>

McCawley J.C., McKerrell H. Soil phosphorus levels at archaeological sites // *Proceedings of the society*. 1971, № 2. Pp. 301–306.

#### Критерии авторства

А.Г. Дмитриев, А.В. Богданов, А.А. Дмитриев подготовили рукопись к печати, имеют на статью авторские права и несут полную ответственность за ее оригинальность.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

of geophysical data. Moscow: Izd-vo AIS. 392 p. (In Russ.)

(1984) Integration of exploration geophysics methods. Moscow: Nedra. 365 p. (In Russ.)

Levinson A.F. (1976) Introduction to exploratory geochemistry. Moscow: Mir. 500 p. (In Russ.)

Martynov A.I., Sher Ya.A. (1989) Methods of archaeological research. Moscow: Vysshaya shkola. 223 p. (In Russ.)

Miklyayev A.M., Gerasimova N.G. (1968) The experience of applying the method of phosphate analysis in the exploration of ancient settlements in the Pskov region. *Sovetskaya arkheologiya = Soviet Archaeology*. No. 3. P. 251–254. (In Russ.)

Perel'man A.I. (1965) Geochemistry of epigenetic processes. Moscow: Nedra. 272 p. (In Russ.)

Stanyukovich A.K. (1996) Archaeological Geophysics in Russia. *Geofizika = Geophysics*. No. 2. P. 57–64. (In Russ.)

Stanyukovich A.K. (1997) The main methods of field archaeological geophysics. *Estestvenno-nauchnye metody v polevoi arkheologii = Natural scientific methods in field archeology*. Iss. 1. P. 19–42. (In Russ.)

Starovoitov A.V. (2008) Interpretation of GPR data. Moscow: Moscow State University. 192 p. (In Russ.)

(1976) Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). *Spravochnik geofizika = Geophysics Reference*. Moscow: Nedra. 527 p. (In Russ.)

Shtobe G.G. (1959) Application of the method of soil research in archeology. *Sovetskaya arkheologiya = Soviet Archeology*. No. 4. P. 135–139. (In Russ.)

Fearon, W.R. An Introduction to Biochemistry, William Heinemanns Medical Books Ltd., 1948, pp. 569.

Holliday, VT & Gartner, WG 2007, 'Methods of soil P analysis in archaeology', *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, no. 2, pp. 301-333. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.05.004>

Kozhevnikov, N.O., Kharinsky, A.V., Snopkov, S.V. Geophysical prospection and archaeological excavation of ancient iron smelting sites in the Barun-Khal valley on the western shore of Lake Baikal (Olkhon region, Siberia). *Archaeological Prospection*. 2019; 26: 103–119. <https://doi.org/10.1002/arp.1727>

McCawley J.C., McKerrell H. Soil phosphorus levels at archaeological sites // *Proceedings of the society*. 1971, № 2. Pp. 301–306.

#### Attribution criteria

A.G. Dmitriev, A.V. Bogdanov, A.A. Dmitriev made the research work, on the basis of the results conducted a compilation, prepared the manuscript for publication, they own the copyright on this article and solely responsible for its originality.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Сведения об авторах

**Дмитриев Александр Георгиевич,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: dmitriev@ex.istu.edu

**Богданов Андрей Викторович,**

доктор технических наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: bogdanov.lab@istu.edu

**Дмитриев Алексей Александрович,**

старший преподаватель кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: dmtaa77@gmail.com

The authors have read and approved the final manuscript.

#### Information about the authors

**Alexander G. Dmitriev,**

Dr. Sci. (Geophysics), Professor of the Department of Applied of Geology, Geophysics and GIS,

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov street, Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: dmitriev@ex.istu.edu

**Andrei V. Bogdanov,**

Dr. Sci. (Engineering), Professor of Department of Mineral Processing and Environmental Protection,

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov street, Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: bogdanov.lab@istu.edu

**Aleksei A. Dmitriev,**

Lecturer of the Department of Electronic and Telecommunication Systems,

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov street, Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: dmtaa77@gmail.com