

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЕРЗШИХ КУРГАНОВ ГОРНОГО АЛТАЯ КОМПЛЕКСНОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**М.И. Эпов, Е.В. Балков, М.А. Чемякина^{*}, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн,
Д.В. Напреев, К.В. Ковбасов**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

^{} Институт археологии и этнографии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17, Россия*

Выявление мерзлоты внутри древних курганов Алтая до начала раскопок при помощи геофизических методов трудно переоценить. До сих пор не было методики, диагностирующей малые объемы мерзлого грунта или льда под каменными курганными насыпями. Эта проблема является одной из актуальных в отечественной археологии. Замерзшие курганы, где в силу природных процессов сохраняются органические материалы, являются исключительным по значимости источником информации об историко-культурных процессах в эпоху раннего железного века. Особенно необходима предваряющая раскопки геофизическая разведка в условиях глобального потепления, с наступлением которого целый пласт уникальной культурно-исторической информации может быть безвозвратно потерян.

Комплексные геофизические исследования последних лет были сосредоточены на изучении группы памятников пазырыкской культуры, в могильных срубках которых высока вероятность обнаружения замерзших объектов. Как правило, такие курганы располагаются на значительной высоте, где присутствует многолетняя мерзлота, что и обеспечивает уникальные условия для сохранения археологических объектов. К таким местностям относится высокогорное плоскогорье Укок (Южный Алтай) и северо-западная часть Монгольского Алтая. На плато Укок систематические полевые исследования были проведены в 2003 и 2007 гг., а на смежной территории Монгольского Алтая — 2005 — 2006 гг. Геофизический комплекс включал вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электротомографию (ЭТ), мало-глубинное частотное сканирование (ЭМС), георадиолокацию (ГР), каппаметрию, гамма-спектрометрию и хроматографию. При планировании полевых работ широко и интенсивно использовалось трехмерное математическое моделирование электрических и электромагнитных полей, предназначенное для реалистичной оценки возможностей геоэлектрики, способов ее оптимального применения при изучении курганов и интерпретации данных.

В 2006 г. на северо-западе Монголии в пределах Алтайской горной системы были проведены археологические раскопки, подтвердившие геофизический прогноз мерзлотных образований во всех объектах, выделенных на основании геофизических исследований 2005 г. В одном из курганов было найдено уникальное по степени сохранности непотревоженное захоронение скифского воина.

Археолого-геофизические исследования, метод сопротивлений, частотное зондирование, хроматография, пазырыкские курганы.

FROZEN MOUNDS IN GORNY ALTAI: GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL STUDIES

**M.I. Epov, E.V. Balkov, M.A. Chemyakina, A.K. Manshtein,
Yu.A. Manshtein, D.V. Napreev, and K.V. Kovbasov**

The importance of pre-excavation permafrost detection within ancient burial mounds in the Altai by geophysical methods is hard to overestimate. There was no way of detecting small quantities of frozen ground or ice under stone mounds, and this is a topical issue in Russian archeology. Frozen mounds, which retain organic matter owing to natural processes, are an exceptional source of information about historical and cultural processes in the Early Iron Age. Pre-excavation geophysical prospecting is especially important in the context of global warming, which might destroy a whole layer of cultural and historical information.

The integrated geophysical studies conducted in recent years focused on a group of archeological sites of the Pazyryk culture whose burial constructions are very likely to contain frozen artifacts. As a rule, such burial mounds are located at a considerable altitude and contain permafrost, which creates unique conditions for the preservation of artifacts. Such localities include the Ukok high plateau (southern Altai) and the northwestern part of Mongolian Altai. Systematic field studies were conducted on the Ukok Plateau in 2003 and 2007 and in the adjacent territory of Mongolian Altai in 2005 and 2006. The following geophysical methods were used: vertical electrical sounding (VES), electrical tomography (ET), shallow frequency scanning (SFS), georadiolocation (GR), magnetic susceptibility measurements, gamma-ray spectrometry, and chromatography. The field works were planned with a heavy reliance on the 3D mathematical modeling of electric and EM fields, which is meant

for a realistic estimate of the possibilities of geoelectrics and the best ways of its application to burial-mound studies and data interpretation.

The excavations conducted in 2006 in northwestern Mongolia within the Altai Mts. confirmed the geophysical prediction for permafrost at all the sites identified by the geophysical studies in 2005. In one of the mounds, they yielded a unique intact tomb of a Scythian warrior.

Archeological and geophysical studies, resistivity method, frequency sounding, chromatography, Pazyryk burial mounds

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние исследования курганных могильников скифской эпохи на плато Укок (Горный Алтай) позволили выявить уникальные комплексы пазырыкской культуры с прекрасно сохранившимися объектами органического происхождения: мумиями людей, изделиями из тканей, дерева, кожи и т.д. Естественная низкотемпературная консервация органических материалов оказалась возможной в силу специфических природных условий, когда под каменной кладкой кургана в деревянном срубе погребальной камеры образуется неоттаиваемая ледовая линза. Именно из этих линз археологи получают исключительные по значимости артефакты, позволяющие реконструировать многие историко-культурные процессы в эпоху раннего железного века. Следует отметить высокую этнографическую сохранность на протяжении 2,5 тыс. лет. Замерзшие курганы стали также уникальным источником информации для целого ряда единственных в своем роде мультидисциплинарных исследований антропологических, палеогенетических, микробиологических, палинологических, палеоботанических, дендрохронологических, физико-химических и др. Опережающие раскопки выявление мерзлоты внутри древних курганов Алтая при помощи геофизических методов становятся важными факторами в разработке эффективной стратегии планируемых археологических исследований.

Естественные условия, способствующие образованию линз мерзлоты в погребальных камерах высокогорных пазырыкских курганов, позволяют, в свою очередь, выработать критерии для дифференциации захоронений, содержащих лед, по электрическому сопротивлению.

КУРГАНЫ ПАЗЫРЫКСКОЙ КУЛЬТУРЫ ГОРНОГО АЛТАЯ С МЕРЗЛОТОЙ

История и изучение погребальных памятников раннего железного века, или так называемой «скифской эпохи», Горного Алтая насчитывает уже более ста лет. В результате археологических изысканий, особенно в 70—90-е годы XX в., были изучены более 1000 курганов IX—II вв. до н.э. Огромный и разнообразный фактический материал позволил реконструировать многие аспекты материальной и духовной культуры ранних кочевников. Особое место среди комплекса памятников пазырыкской культуры по степени информативности, несомненно, занимают могильники с линзами мерзлоты.

История исследования. Изучение курганов силами Института археологии и этнографии СО РАН началось в 1970-е годы В.Д. Кубаревым. Среди десятков небольших курганов, рядовых носителей пазырыкской культуры, были обнаружены и комплексы с мерзлотой [Кубарев, 1987, 1991]. С этого времени стало ясно, что мерзлота в погребальных срубах может быть не только в больших курганах с мощными каменными выкладками и глубокими могильными ямами.

Новым этапом в изучении замерзших курганов пазырыкской культуры стали масштабные археологические исследования на плоскогорье Укок (Южный Алтай), проведенные Н.В. Полосьмак и В.И. Молодиным в 1990-е годы. Наряду с раскопками производились разведочные работы со сплошным картографированием всех обнаруженных объектов. Наиболее представительными как по числу памятников, так и по материалам, полученным при раскопках, оказались комплексы пазырыкской культуры (VI—II вв. до н.э.). Исследования курганных могильников позволили выявить уникальные комплексы с прекрасно сохранившимися изделиями из тканей, дерева, кожи. В двух случаях до нас дошли и мумии людей. Такая естественная консервация органических материалов оказалась возможной в силу природных условий, когда под каменной кладкой кургана в срубе погребальной камеры образуется лед, который впоследствии не оттаивает. Полученные археологические материалы послужили дальнейшей базой для широких мультидисциплинарных исследований [Феномен..., 2000; Молодин и др., 2004; Полосьмак, 2001].

Опыт археологического изучения Укока показал, что практически в сходных условиях в рамках одной территории (высота над уровнем моря, конструкция кургана, экспозиция и др.) мерзлота не является постоянным фактором. В силу этого стала актуальной задача прогноза мерзлоты геофизическими методами до начала раскопок.

Анализ расположения и устройства курганных могильников. Детальные исследования погребальных сооружений кочевников, живших в VI—II вв. до н.э. в горных районах Алтая, позволили уста-

новить их характерные и специфические особенности [Тишкин, Дашковский, 2003]. Большая часть курганов включает каменную насыпь (в ряде случаев с кольцевой каменной выкладкой по ее периметру), могильную яму, установленную на дне деревянную конструкцию в виде сруба. Внутри последнего мог сооружаться деревянный настил-пол, а сверху — накат из аналогичного материала. Так называемые классические памятники пазырыкской культуры известны на всей территории Горного Алтая, но в большей степени они сконцентрированы в его центральном и юго-восточном районах. В работе [Полосмак, 2001] представлена карта расположения основных пазырыкских могильников на территории Горного Алтая.

Сосредоточим свое внимание на той группе памятников, в могильных срубах которых высока вероятность нахождения льда. Подобные курганы находятся на довольно большой высоте — там, где есть многолетняя мерзлота. К такой местности относятся высокогорное плоскогорье Укок (Южный Алтай) и речные долины северо-западной части Монгольского Алтая, в частности, долина р. Олон-Курин-Гол. На плато Укок памятники располагаются на поверхности, сформированной моренами и временными горными потоками. На территории Монгольского Алтая курганы находятся на надпойменных речных террасах.

Погребальные сооружения кочевников, несмотря на определенную вариабельность в параметрах и конструктивных элементах, представлены преимущественно курганами с каменными насыпями высотой от первых до двух десятков метров. Под насыпями в ямах сооружались деревянные срубы, внутри которых мог находиться деревянный настил-пол, а сверху — накат из аналогичного материала. Реже в могильных ямах находились каменные ящики и рамы, а также другие конструкции (каменная обкладка, деревянный ящик и др.). Каменная насыпь одного из курганов в долине р. Олон-Курин-Гол (Монгольский Алтай) показана на рис. 1. Впоследствии его строение было исследовано с помощью метода сопро- тивлений.

Геоэлектрические модели кургана и вмещающей среды. Для теоретического анализа электрических и электромагнитных полей, возбуждаемых при геофизических исследованиях, необходимо построить геоэлектрические модели кургана и вмещающей его среды. Геологическая среда на участке расположения курганов может быть представлена локально горизонтальными напластованиями, как это наблюдалось на плато Укок. С другой стороны, отложения в районе курганов, расположенных в относительно узких речных долинах, зажатых между крутыми каменистыми хребтами, вкострости долины имеют полосчатую структуру. Она обусловлена направлением потоков воды с окружающих гор. Также структура может быть хаотической, сложенной из обломков камней, что характерно для моренных отложений.

В некоторых местах расположения курганов может быть небольшой плодородный слой почвы (несколько сантиметров). В силу этого верхняя часть разреза бывает довольно проводящей (удельное электрическое сопротивление (УЭС) менее 50 Ом·м). В других местах, несмотря на то, что отложения



Рис. 1. Долина р. Олон-Курин-Гол (северо-запад Монгольского Алтая).

Установка электротомографии с системой наблюдения, расположенной по периметру кургана.

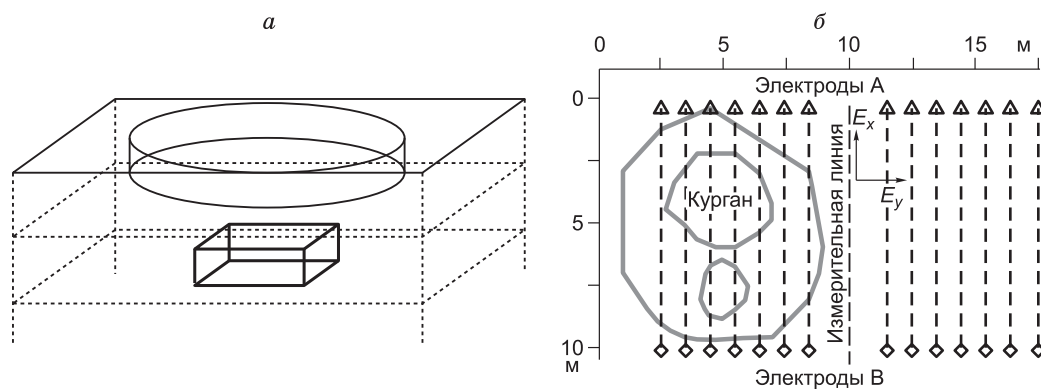


Рис. 2. Модель кургана, принятая с горизонтально-слоистой вмещающей средой (а); схема расположения электродов по периметру кургана для установки электротомографии (б).

состоят из галечника и валунов, присутствует глинистая связующая. Последняя обеспечивает накопление влаги и значительную электропроводность этих отложений. В других местах они полностью сложены галечником с валунами, и в них практически отсутствует связующая составляющая. На таких местах нет растительности, поскольку нет запасов влаги. УЭС этих отложений превышает 1 кОм·м. На большинстве территорий распространена многолетняя или сезонная мерзлота.

Исходя из выше изложенного, были выбраны следующие геоэлектрические модели вмещающей среды для курганов: горизонтально- и наклонно-слоистая. Первая из них соответствует горизонтальным плоским участкам. Кроме того, в речных долинах, где рельеф изрезан ручьями, стекающими с окружающих долину гор, может использоваться слоисто-полосчатая модель. Блочная модель, составленная из конечного числа прямоугольных параллелепипедов заданного УЭС, может применяться для моделирования и интерпретации в наиболее сложных случаях.

Модель каменной насыпи принята в виде горизонтального диска заданной мощности и диаметра, расположенного на дневной поверхности. Могильную яму и сруб можно приближенно описать прямоугольным параллелепипедом заданного размера, погруженного на определенную глубину под каменную насыпь. На рис. 2, а показана модель кургана при горизонтально-слоистой модели вмещающей среды.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Каменная насыпь, расположенная непосредственно над могильной камерой кургана, делает невозможным заземление электродов на его поверхности. По этой причине была предложена специальная схема расположения электродов (см. рис. 1, 2, б). Токовые электроды (А, В) размещаются попарно на диаметрально противоположных точках по разные стороны от курганной насыпи. При этом диаметр выбирается так, чтобы он был немного больше диаметра насыпи. В нескольких точках на параллельных отрезках, касательных к насыпи, с постоянным шагом устанавливаются измерительные электроды. В такой установке измеряются взаимно ортогональные горизонтальные компоненты электрического поля (E_x и E_y), а точнее соответствующие им разности потенциалов. Измерения выполнялись для каждой пары токовых электродов. Для пересчета в электрическое поле они нормируются на измерительную базу, а затем приводятся к единичному току. Таким образом выполняется $m \cdot 2n$ измерений двух компонент электрического поля (m — число пар токовых электродов, n — число пар приемных электродов, коэффициент 2 учитывает тот факт, что измерения осуществляются на двух противоположных сторонах кургана). Использовать эти данные для построения модели затруднительно, поскольку неизвестно строение вмещающей среды. Для решения последней задачи выбирался референтный участок с неизменной структурой вмещающей среды. При этом одна из сторон участка совпадала с линией расположения измерительных электродов. Таким образом, мы получаем еще референтный набор, состоящий из $m \cdot 2n$ измерений над вмещающей средой. Для получения сигналов, обусловленных курганом, из измерений над курганом вычитаются измерения над референтным участком. Результат представляется в виде карт распределения абсолютных и относительных разностей сигналов, выраженных соответственно в мВ/м и %. Отметим, что измерения привязываются не к измерительной паре, а к положению пары токовых электродов. Условимся называть подобные распределения сигнала — абсолютными (относительными) смещенными аномалиями электрического поля.

Кроме метода сопротивлений использовался метод частотного электромагнитного зондирования (ЧЭЗ) с индукционным возбуждением, реализованный в аппаратурно-программном комплексе ЭМС (электромагнитный сканер) [Балков, Манштейн, 2001]. Этот метод, неоднократно применявшийся в археолого-геофизических работах [Эпов и др., 2000; Молодин и др., 2001; Балков и др., 2006], дает возможность выполнять геофизическую съемку непосредственно над курганом. Однако характерные для большинства типов вмещающей среды большие значения УЭС и искомый объект (могильная яма и сруб) также повышенного УЭС накладывают ограничения на применение этого метода из-за низкого уровня измеряемых сигнала. В этой связи с 2007 г. стало использоваться георадиолокационное зондирование (георадар ГРОТ-12), особенно эффективное в высокоомных средах.

Комплексное применение геоэлектрических методов позволяет достоверно выделять ледовые линзы (изоляторы достаточной мощности) в кургане. Вместе с тем достаточно велика вероятность обнаружения в курганах ледовых линз, не связанных с археологическими объектами. Геоэлектрика не позволяет провести разделение линз по этому критерию. Для решения этой задачи впервые в мировой практике было предложено использовать газовые хроматографы. Основанием для их применения являются два фактора: отсутствие лесной растительности в районе расположения высокогорных курганов и наличие специфических соединений в лиственничной древесине, из которой выполнен сруб.

Для этой цели были использованы высокочувствительный газовый хроматограф ЭХО-ФИД, каппаметр КТ-6 и гамма-спектрометр МКС АТ-6101Д. Хроматограф детектирует углеводороды ароматического ряда и обладает уникальной чувствительностью (около 10^{-12} г/см³). Гамма-спектрометром измерялся гамма-фон с измерением спектра излучений от трех основных изотопов ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th.

Лиственничная древесина из погребенного сруба имеет свой уникальный запах, который может быть зафиксирован на хроматограмме. Как уже указывалось, на плато Укок деревья, в том числе лиственница, не растут. До полевых работ был проведен анализ запаха образцов лиственницы, не обработанных химическими реактивами, из срубов пазырыкских курганов Укока. Локализация в небольшом объеме скопления органического материала приводит к образованию ореола его рассеяния. Это вызывает изменение окислительно-восстановительной обстановки в окружающей среде. Таким образом формируется своеобразный геохимический барьер для радиоактивных изотопов. Логично предположить, что над курганами, содержащими большой объем органики, будет соответствующая аномалия. Поэтому в методическую программу исследований наряду с хроматографией были включены измерения радиационного фона и магнитной восприимчивости [Эпов и др., 2008].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для изучения возможностей и особенностей метода сопротивлений в предложенной модификации выполнено математическое моделирование постоянного электрического поля. Геоэлектрическая модель кургана является трехмерной, поэтому решалась прямая задача той же размерности [Ковбасов, 2006].

Математическое моделирование аномальных полей при наличии изолирующей линзы высокого УЭС. Моделирование выполнялось для четырехслойной модели вмещающей среды с УЭС 100, 200, 300 и 1100 Ом·м (сверху вниз). Мощности наиболее проводящих верхних слоев составляют примерно 1 м. Такая модель была построена по результатам геофизического изучения одного из курганов на плато Укок в 2003 г. [Эпов и др., 2003]. Изолятор, имитирующий ледяную линзу (размеры $2 \times 1 \times 1$ м), находился в центре кургана на глубине 1 м (верхняя граница) от дневной поверхности. Результаты математического моделирования приведены на рис. 3. Это карты распределения абсолютных значений аномальных полей E_x и E_y , приведенных к единичному току, для различных положений токовых электродов. Аномальная область располагается над эпицентральной частью неоднородности. Сигнал носит дипольный характер. Отметим, что наибольшая ось аномальной зоны ортогональна линии АВ. Наибольшие значения E_x сосредоточены в пределах курганной насыпи и не могут быть измерены. Вне этой области измеренные значения аномального сигнала сосредоточены вблизи токовой линии. Причем смещение линии АВ с центральной оси неоднородности не изменяет качественную картину распределения аномального сигнала, а только уменьшает его значения.

Распределение аномального сигнала E_y (см. рис. 3, $z—e$) носит не дипольный, а квадрупольный характер. Следовательно, ему свойственны повышенные геометрические затухания, и наибольшие значения сосредоточены на участке каменной насыпи.

Наибольшие аномалии сигнала E_x наблюдаются при несимметричном расположении токовых электродов относительно ледовой линзы (см. рис. 3, $жс—и$). Таким образом, наиболее удобной для измерения является компонента E_x в окрестности токовой линии.

Выявление линзы и определение ее местоположения (по синтетическим данным). Были изучены распределения абсолютных аномалий поля E_x для различных положений токовых электродов. Установлено, что аномальный сигнал увеличивается с их приближением по любому направлению к изоли-

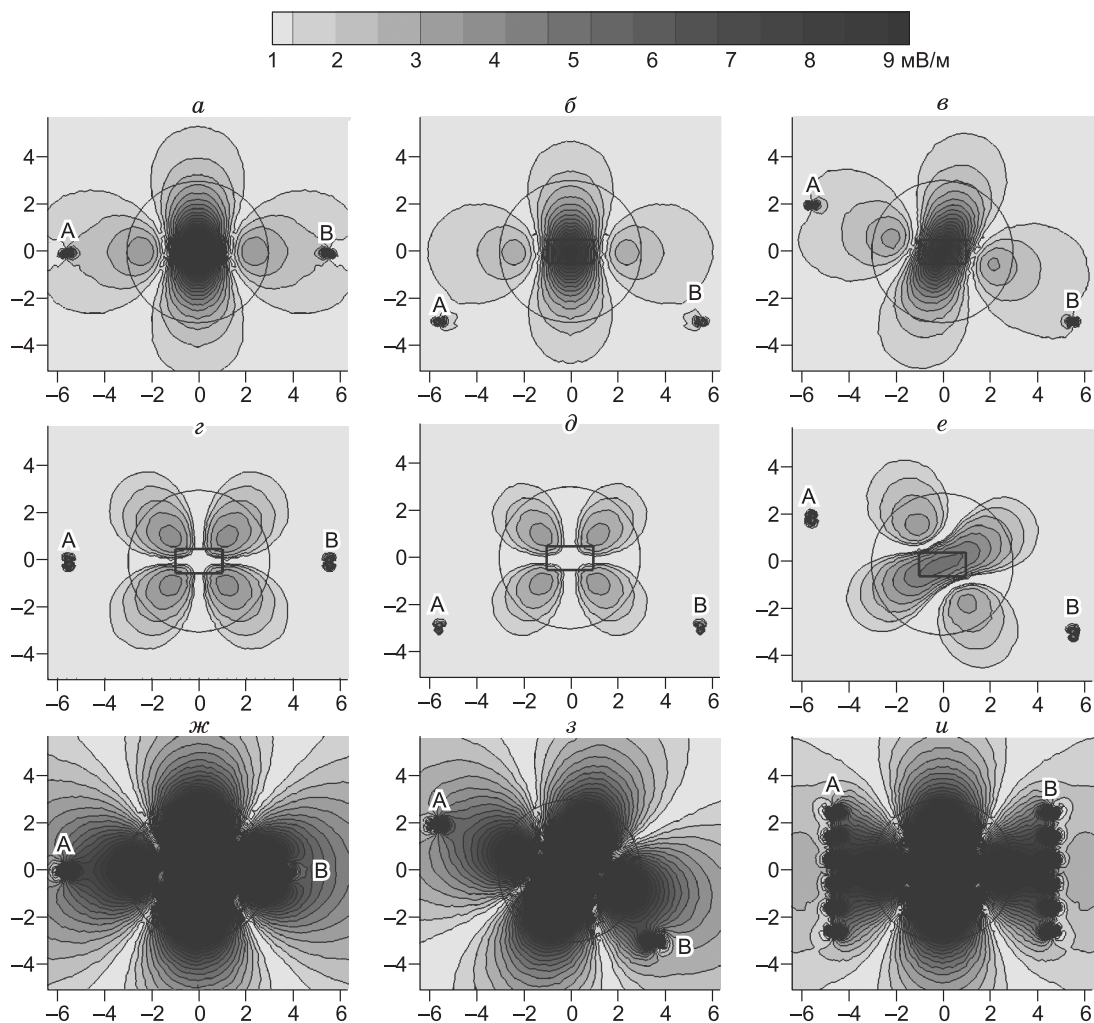


Рис. 3. Абсолютные аномалии компонент электрического поля E_x (а—в) и E_y (г—е) при различном расположении токовых электродов; абсолютная аномалия E_x при несимметричном расположении двух (ж, з) и более токовых электродов (и).

рующему объекту. Электродная конфигурация, практиковавшаяся при работах в 2003 г. на плато Укок, предусматривала несколько вариантов положения токовых электродов с одной фиксированной на местности измерительной линией.

На рис. 4, а приведено распределение абсолютной смещенной аномалии поля E_x . Установка была выбрана такой, как при исследовании кургана Олон-Курин-Гол-6 в 2005 г. Центр аномалии совпадает с эпицентром ледовой линзы. О форме и размерах объекта судить по этим данным затруднительно. Однако то, что по смещенным аномалиям, построенным по измерениям, выполненным по периметру объекта, можно установить положение эпицентра изолирующего тела, является новым.

Математическое моделирование аномальных полей при несимметричном расположении двух и более генераторных электродов. Было проведено моделирование сигналов, когда токовые электроды находятся асимметрично относительно изолирующего объекта. Именно такая конфигурация наиболее близка к практике, так как реальная расстановка электродов с большой степенью вероятности получится асимметричной (см. рис. 3, ж, з). Аномальные значения E_x значительно возрастают по величине, что в конечном счете должно благоприятно сказаться на качестве экспериментального материала. Необходимо отметить, что наибольшие аномалии сигнала остаются над изолятором даже при перемещении питающих электродов. Это еще раз подтверждает тот факт, что эпицентр аномалии определяется ее источником. Было выполнено моделирование сигналов для различных многоэлектродных конфигураций. Распределение значений E_x для установки с шестью парами токовых электродов показано на рис. 3, и. В этом случае наблюдается значительное увеличение аномального сигнала, способствующего

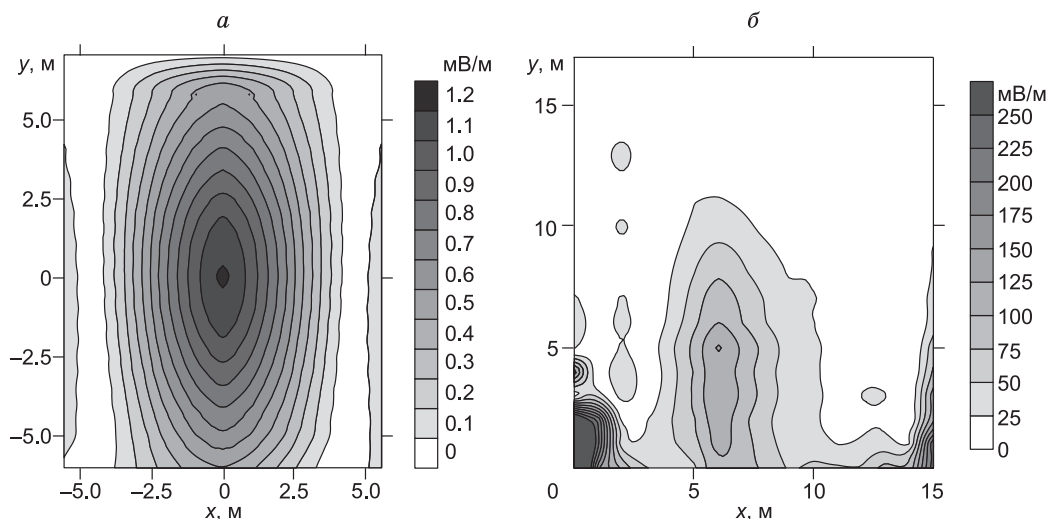


Рис. 4. Распределение абсолютных аномалий поля E_x :

a — на основе синтетических сигналов для установки на кургане Олон-Курин-Гол-6; *б* — по экспериментальным данным, полученным на кургане Улан-Даба-1.

точным измерениям в неблагоприятных условиях (каменная насыпь большого диаметра, высокое сопротивление среды и т.п.). Однако многоэлектродная питающая конфигурация не дает возможности измерения значений E_x над курганом с целью уточнения положения центра изолирующего объекта. Поэтому такую конфигурацию можно использовать только для выявления изолирующего объекта при низких уровнях сигналов.

Сопоставление экспериментальных данных метода сопротивлений и результатов математического моделирования. Летом 2003 г. на плато Укок сотрудниками Института археологии и этнографии СО РАН и Института геофизики СО РАН проводились совместные полевые работы. Отрабатывались методики распознавания замерзших погребений и выбор перспективных геофизических методик [Эпов и др., 2003]. Наряду с зондированиями на постоянном токе были также осуществлены полевые работы комплексом ЭМС. Летом 2005 и 2006 гг. аналогичные исследования были выполнены в горах Монгольского Алтая [Эпов и др., 2005, 2006] на курганах, обнаруженных при археологической разведке долины р. Олон-Курин-Гол в 2004 г.

Первоочередной задачей моделирования являлась верификация экспериментальных данных. Необходимо было установить геоэлектрическую модель среды, окружающей курган. Она была построена по данным ВЭЗ, выполненным по профилям вокруг кургана. Количественно данные трехмерного моделирования соответствуют экспериментальным (рис. 5, *a*, *б*). Однако последние (E_x) характеризовались протяженной узкой неоднородностью вдоль оси ординат. Было выдвинуто предположение, что эта особенность связана с приповерхностной тропой, по которой, скорее всего, к кургану волоком перемещали бульжники для насыпки каменного кургана. В модель было внесено линейное углубление в рельефе. Удалось подобрать ее параметры (овальное сечение шириной 0.5 м и глубиной 0.25 м, заполненное грунтом с УЭС, равным 40 Ом·м, и УЭС вмещающей среды 50 Ом·м). Синтетические данные для такой модели хорошо коррелируют с измерениями, что свидетельствует о правильном предположении модели.

Распределение измерений E_y по площади несимметрично относительно линии $x = -1$ (см. рис. 5, *в*). Расчеты показали, что несимметрия объясняется небольшим наклоном границ между слоями с различным УЭС. Распределение компоненты E_y при наклоне границ 10° показано на рис. 5, *г*. Введением зенитного угла удалось согласовать синтетические и экспериментальные данные. Таким образом, была определена структура вмещающей среды для этого участка.

На одном из объектов (2005 г., курган Улан-Даба-1) картина распределения компоненты E_x над поверхностью за нетронутым раскопками участком среды значительно отличалась от распределения над горизонтально-слоистой средой. Анализ морфологии рельефа исследованного участка позволил выделить продольные (в направлении от референтного участка к объекту) неоднородности, связанные с течением талых вод. Таким образом, в направлении от референтного участка к кургану была принята двумерная модель среды. При инверсии соответствующие неоднородности помещались на границе первого и второго слоев. В результате удалось подобрать параметры модели среды, используемой в качестве вмещающей для изолирующего объекта в кургане. Результаты инверсии приведены на рис. 5, *д*, *е*.

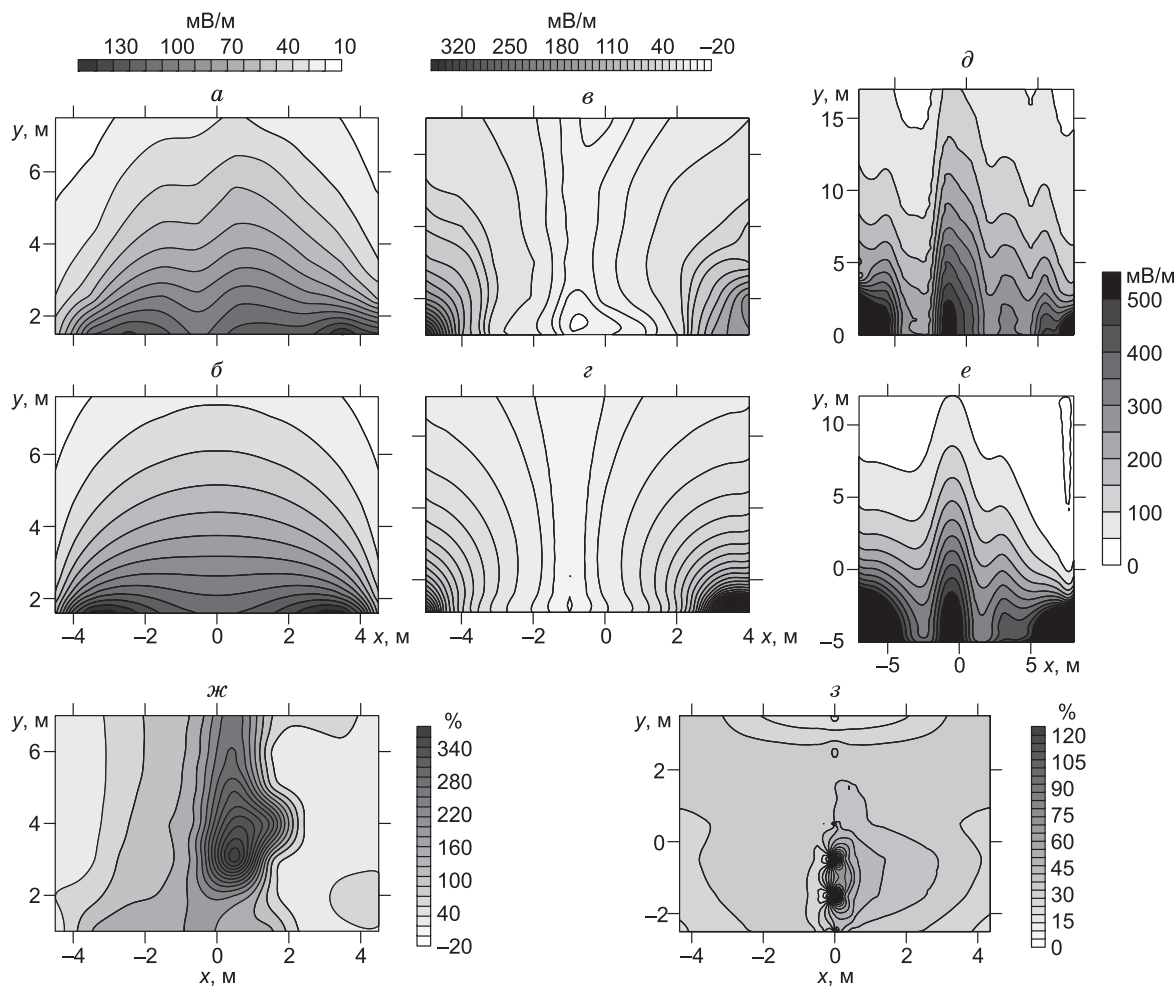


Рис. 5. Курган 4 могильника Верх-Кальджин-2 (а—г, ж, з), курган Улан-Даба-1 (д, е).

Нормальные поля экспериментальных значений электрического поля E_x (а, д), E_y (в) и соответствующие им синтетические данные (б, г, е). Смещенные аномальные экспериментальные и синтетические распределения (ж, з) компоненты E_y .

Обнаружение ледовой линзы по экспериментальным данным и определение ее размеров.

Вторая задача состояла в определении положения, размеров и ориентации могильной камеры. Критериями решения этой задачи было совпадение синтетических и измеренных сигналов в пределах точности измерений. В связи с ресурсоемкостью решения прямой задачи не удалось подобрать все параметры модели. Было получено качественное подтверждение для абсолютной смещенной аномалии E_x (см. рис. 4) и относительной смещенной аномалии E_y (см. рис. 5, ж, з).

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные полевые исследования с использованием описанных выше методик были проведены в 2003 и 2007 гг. на плато Укок, а также в 2005—2006 гг. на сопредельной территории Монгольского Алтая.

Исследования на плато Укок 2003 г. Для первой геофизической разведки были специально выбраны курганы пазырыкской культуры на тех могильниках, где уже производились археологические исследования.

Курганный могильник Верх-Кальджин-2 в северной части плоскогорья Укок на правом берегу р. Кальджин был открыт и частично исследовался В.И. Молодиным в 1994—1995 гг. Памятник состоит из пяти курганов, протянувшихся цепочкой с севера на юг. Насыпи курганов сложены из рваного сланца и крупного валунника, полы сильно задернованы. Курганы 1—3 раскопаны, в погребальных склепах были обнаружены линзы мерзлоты. Геофизическому исследованию подверглись оставшиеся не раскопанными курганы 4, 5.

Курганный могильник Бертек-1 расположен в Бертекской долине на левом берегу р. Ак-Алаха и состоит из пяти курганных насыпей, сложенных из окатанных валунов и вытянутых цепочкой с северо-востока на юго-запад. Полы курганов задернованы. Курган 1 был исследован В.И. Молодиным, мерзлота в погребальной камере не обнаружено. Для геофизических исследований выбрали курган 4. К тому времени археологическое изучение разновременных курганных могильников микрорайона Бертекской долины показало, что ни в одном из них мерзлота не была обнаружена.

Таким образом, первые геофизические исследования, направленные на отработку методики по поиску мерзлоты, были спланированы на принципиально различных памятниках. В первом случае с достаточно большой долей вероятности предполагалось наличие мерзлоты в захоронениях, во втором — отсутствие льда и мерзлого грунта было практически очевидным. Такие неоднородные по структуре и физическим показателям объекты были выбраны для корректного сопоставления геофизических построений [Эпов и др., 2003].

С помощью метода сопротивлений по описанной выше методике были исследованы курганы 4, 5 могильника Верх-Кальджин-2. В центре карты (см. рис. 5, ж) выделена значительная аномалия (360 отн. ед.), обусловленная непроводящим объектом, расположенным в центральной части кургана. Метод сопротивлений на кургане 5 и на курганах памятника Бертек-1 не выявил аномалий, близких по величине и форме к обнаруженной на кургане 4.

Применение модификации метода сопротивлений позволило диагностировать наличие во вмещающем грунте области высокого УЭС, связанной со льдом в захоронении. Анализ измеренных данных показал, что из трех исследованных объектов только курган 4 могильника Верх-Кальджин-2 характеризуется аномалией высокого УЭС, приуроченной к средней части кургана. Геометрические размеры этой аномалии близки к ожидаемому размеру замерзшей погребальной камеры [Эпов и др., 2003]. Для подтверждения полученных результатов и корректировки геофизических методик необходимо проведение археологических работ на этих объектах.

На основании данных частотного зондирования была предпринята попытка определения параметров линзы. Благодаря совместной интерпретации сигналов с данными метода сопротивлений была определена привязка сигналов частотного зондирования по глубине. Карта распределения кажущегося электрического сопротивления над курганом, на которой выделяется высокоомный объект, представлена на рис. 6, а. В результате выделения высокоомной области была построена изоповерхность, внутри которой сопротивление превышает 500 Ом·м (см. рис. 6, б). Ее размеры позволяют судить о размерах линзы мерзлоты.

Исследования на Монгольском Алтае 2005—2006 гг. Дальнейшее геофизическое изучение, основанное на опыте работ на плато Укок, выполнялось в 2005—2006 гг. на северо-западе Монголии. Базой для исследований послужили результаты археологической разведки 2004 г. в высокогорной зоне Баян-Ульгийского аймака, одного из наименее изученных в этом аспекте районов Монголии [Молодин и др., 2004]. Выбор объектов исследования основан на анализе морфологических признаков, позволяющем предварительно отнести курганы к пазырыкской культуре с обязательным учетом высотных отметок над уровнем моря. На ряде выбранных объектов проводились комплексные геофизические исследования с целью выявления мерзлоты в погребальных камерах.

В 2005 г. изучены шесть курганных могильников в долинах рек Улан-Даба, Олон-Курин-Гол и Цаган-Салаа: Олон-Курин-Гол-6 (курган 2), Олон-Курин-Гол-7 (курган 1), Олон-Курин-Гол-10 (курган 1), Цаган-Салаа-1 (курган 1), Цаган-Салаа-2 (курган 1) и Улан-Даба-1

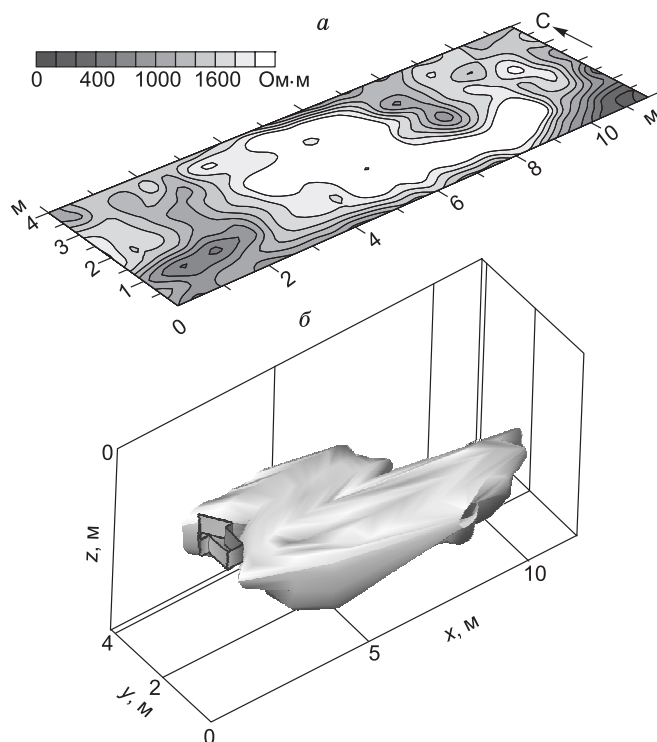


Рис. 6. Курган 4 могильника Верх-Кальджин-2.

а — карта кажущихся удельных электрических сопротивлений на частоте 15 кГц (данные ЭМС), б — изоповерхность значения 500 Ом·м, ограничивающая изолятор.

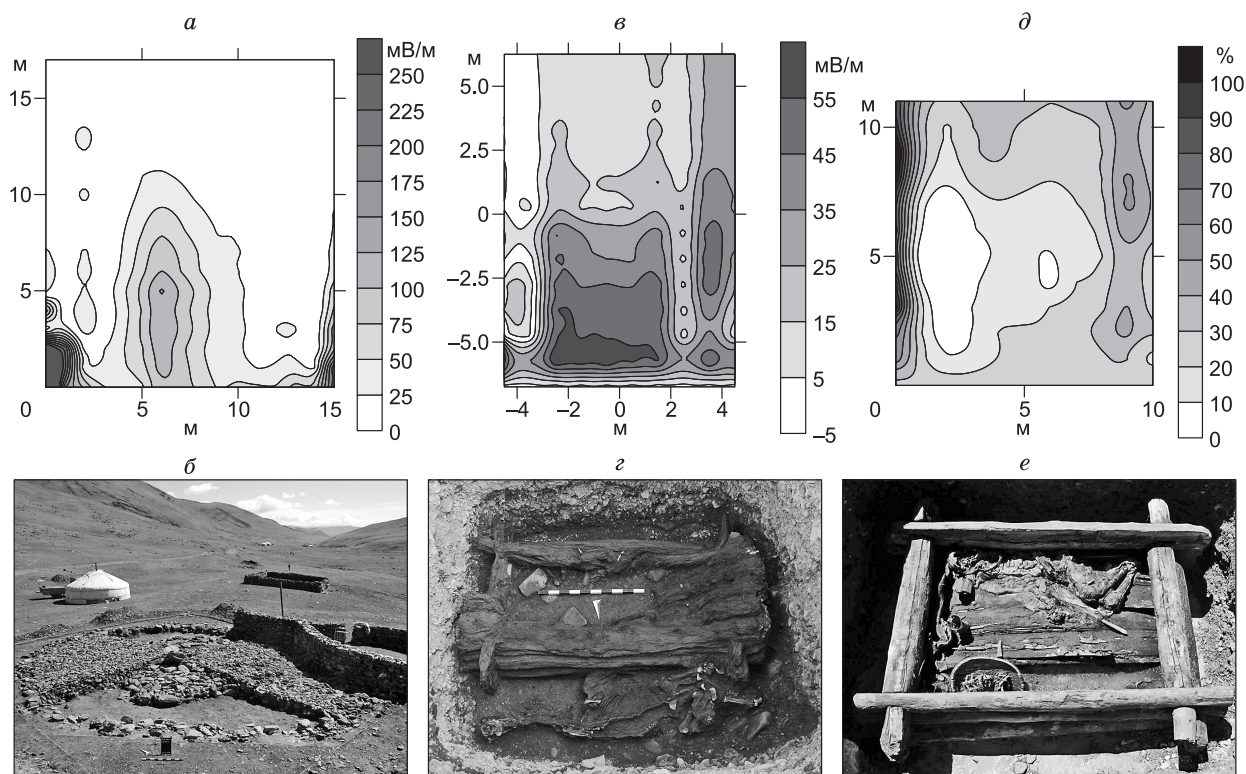


Рис. 7. Карта смещенных аномалий электрического поля E_x (*a*, *в* — смещенная абсолютная аномалия, *д* — относительная) и результаты археологических раскопок.

a, *б* — Улан-Даба-1, выявлена естественная линза льда в конусе выноса; *в*, *з* — Олон-Курин-Гол-6 (курган 2), выявлено ограбленное захоронение, в котором сруб с мерзлотой находился на глубине 2 м, *д*, *е* — Олон-Курин-Гол-10 (курган 1), обнаружено захоронение древнего воина.

(курган 1). В результате были выявлены наиболее перспективные для дальнейшего исследования курганы, расположенные на высоте 2500—2600 м над ур. м. [Эпов и др., 2005].

Аномальные электрические поля измерялись на площадной сетке. При анализе выделялись аномальные зоны замкнутой формы, представленные более чем одним рядом или столбцом аномальных значений. Изучались как абсолютные, так и относительные смещенные аномальные электрические поля. Наиболее выразительные из них интерпретировались с привлечением прямого математического моделирования. Из рассмотрения исключались аномалии, имеющие полосчатую протяженную форму, обусловленные высоким сопротивлением заземления единичных электродов, а также аномалии вблизи токовых электродов.

Результаты, позволяющие предположить наличие непроводящих ледовых линз, были получены при исследовании объектов Улан-Даба-1, Олон-Курин-Гол-10 и Олон-Курин-Гол-6. Наиболее выраженной была аномальная зона на кургане 1 Улан-Даба-1 (рис. 7, *a*). Судя по ее площадному распределению, эпицентр изолирующего объекта, соответствующего линзе мерзлоты, находится в точке с координатами (6,5). Менее выраженной была аномальная зона на кургане 2 Олон-Курин-Гол-6 (см. рис. 7, *в*). Аномалия «обратного» характера с низким значением абсолютной величины на фоне высоких фоновых значений получена на кургане 1 Олон-Курин-Гол-10 (см. рис. 7, *д*). Эта аномалия также позволяла отнести этот курган к перспективным. Причиной «обратного» характера аномалии является систематический сдвиг значений полей на изучаемом и референтном участках из-за разницы УЭС во вмещающей среде.

В 2006 г. исследованы Олон-Курин-Гол-9 (курганы 3, 4), Олон-Курин-Гол-3 (курган 1), Олон-Курин-Гол-12 (курганы 1, 4), Олон-Курин-Гол-Устье-2 (курган 1), Улан-Даба-1 (курган 1) [Эпов и др., 2006]. При этом площадные измерения методом сопротивлений проведены на пяти из исследованных курганов.

По результатам обработки данных комплексной электроразведки на постоянном и переменном токах на двух курганах выделены значительные аномалии повышенного кажущегося сопротивления — это Олон-Курин-Гол-3 (курган 1) и Олон-Курин-Гол-9 (курган 4). По результатам метода сопротивлений

на кургане Олон-Курин-Гол-Устье-2 также отмечена аномалия высоких значений кажущегося сопротивления. Однако ее форма не позволяет с достаточным уровнем достоверности судить о наличии ледовой линзы внутри кургана.

Каменная насыпь кургана 4 (Олон-Курин-Гол-9) в значительной мере была разобрана местным населением. Это дало возможность выполнить электропрофилирование установкой Веннера с разносом 0.7 м непосредственно через курган. Данные ЧЭЗ и электрического профилирования по центральной оси кургана хорошо согласуются с результатами метода сопротивлений и позволяют сделать вывод о наличии высокоомной аномалии с низкоомным обрамлением внутри этого кургана [Эпов и др., 2006].

На кургане 1 (Олон-Курин-Гол-3) получены карты кажущихся сопротивлений. Мощность рыхлых отложений, по данным ВЭЗ, выполненных на референтном участке, составила около 1 м. Под курганом наблюдается повышенное значение УЭС по сравнению с окружающей средой. Возможно, это связано с массивным обледенением грунта на глубинах более 1 м [Эпов и др., 2006].

Исследования на плато Укок в 2007 г. Были выполнены геофизические исследования курганных могильников Бертек-1, Бертек-10, Верх-Кальджин-2, Верх-Кальджин-3, Верх-Кальджин-6 и открытый в 2007 г. В.И. Молодиным новый курганный могильник Верх-Кальджин-13.

Предварительные результаты показали, что наличие льда в погребальных камерах возможно в кургане 4 могильника Верх-Кальджин-2, в западной части кургана 3 и в центральной части кургана 4 могильника Верх-Кальджин-3.

Верх-Кальджин-2 (курган 4). Геоэлектрический разрез за пределами кургана по измерениям ВЭЗ представляет собой слой мощностью 1.2 м и УЭС 34.3 Ом·м, лежащий на полупространстве с сопротивлением около 5000 Ом·м. Результаты измерений многоэлектродной установкой показали, что в средней части площади (середина кургана) увеличивается сопротивление, что может быть вызвано как льдом, так и каменной кладкой. Подобный вывод был сделан и по измерениям в 2003 г. При сравнении характера радарограмм, выполненных георадаром, в пределах кургана и вне его отмечены большие периоды колебаний вне кургана, что соответствует наличию слабоконтрастных границ. Под каменной кладкой колебания сжимаются по времени, что соответствует более четким границам с разными значениями УЭС и диэлектрической проницаемости. В северо-западной части кургана на трассах по двум профилям выделяется серия четко выраженных продолжительных колебаний. Поскольку эта область слабо выделяется по электрическим измерениям, можно предположить, что здесь нет высококонтрастного по УЭС объекта. Менее выраженная аномалия такого же характера находится на юго-востоке кургана [Эпов и др., 2007].

Верх-Кальджин-3 (курганы 3, 4). Геоэлектрический разрез за пределами курганов, по данным ВЭЗ, представлен верхним слоем мощностью 0.6 м и УЭС 56 Ом·м, средним слоем мощностью 2 м и УЭС 85 Ом·м и подстилающим полупространством с сопротивлением более 5000 Ом·м. На картах распределения относительных аномалий многоэлектродной установки над курганами 3 и 4 [Эпов и др., 2007] наблюдаются области высоких значений, соответствующие повышенным сопротивлениям. Результаты измерения комплексом ЭМС по профилю через центр кургана 3 также показывают область повышенного сопротивления. На радарограммах за пределами курганов выделяются две отражающих границы, соответствующие данным ВЭЗ. На профиле между курганами отмечается область ослабления контрастности (уменьшается время прихода и ширина колебаний радарограммы) [Эпов и др., 2007].

На этих курганах впервые были проведены анализы газовой составляющей в каменных насыпях кургана. Предполагалось, что лиственница, из которой сделан погребенный сруб, выделяет специфический спектр веществ, который может быть зафиксирован на хроматограмме. Очень важно отметить, что на плато Укок деревья не растут, поэтому отсутствует естественный фон. Предварительно было проведено изучение запаха образцов лиственницы из пазырыкских курганов Укока [Эпов и др., 2007]. Для этого были отобраны необработанные химическими реактивами образцы, упакованные в пластиковую пленку. После анализа спектра последней было выяснено, что она инертна при 20 °С, однако при нагреве на 15 °С начинает активно выделять углеводороды, в первую очередь, бензол и толуол. Таким образом, из всего богатого спектра углеводородов надежным маркером лиственничной древесины остался только кумол, которого не было в упаковочной пленке.

Пробы грунта для анализа на хроматографе и каплетре брались из-под тонкого слоя дерна либо крупных камней насыпи, там, где дерн отсутствовал. Грунт помещался в специальный контейнер и выдерживался до установления парагазового равновесия. Затем этот воздух исследовался на хроматографе. В местах проб проводились измерения магнитной восприимчивости общего гамма-фона, а затем осуществлялась съемка спектра по трем изотопам (^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra). По площади кургана выполнялось несколько десятков измерений гамма-фона.

Аналогичные результаты дали первые пробы с курганов 3 и 4 могильника Бертек-10. Они брались по двум профилям с интервалом 2 м, начиная с расстояния 10 м от контура насыпи. В дальнейшем оказалось достаточно брать пробы в трех точках: на расстоянии 10 м, на границе насыпи и в центре курга-

на. Магнитная восприимчивость почвы в центре курганов оказалась вдвое меньше, чем за его контуром. Значения же гамма-фона в центре курганов (12.5 мкР/ч) были выше, чем за его границами (9—10 мкР/ч). При этом содержание изотопов ^{40}K и ^{232}Th в среднем росло, а ^{226}Ra убывало.

Хроматограммы проб на периферии практически не менялись по мере приближения к кургану. Лишь пробы на границе кургана и в центре обнаружили наличие нескольких новых веществ. Два из них были проинтерпретированы как м-ксилол и кумол, ранее они детектировались в качестве контрольных. Таким образом, можно предположить, что в этих курганах есть листовенничная древесина.

Дальнейшие исследования подтвердили первоначальные наблюдения. Практически при всех измерениях значения магнитной восприимчивости образцов грунта, отобранных в центральной части кургана, были ниже, нежели с периферии. Вероятным объяснением этого факта может служить интенсивное вымывание тяжелых минералов железа в полости кургана. Показатели радиоактивности возрастали в обратной последовательности. Значения гамма-фона в центре кургана (участки 2.5—3 м в диаметре) иногда более чем в два раза превосходили законтурные значения. Максимальные значения достигали 19 мкР/ч (Верх-Кальджин-2, курган 4), при фоновых значениях, равных 7—9 мкР/ч. Измерения радиоактивности всех типов каменного материала, из которых сложены курганы, и коренных выходов различных пород не превышали 12 мкР/ч. Следовательно, выявленные радиационные аномалии над курганами, вероятнее всего, связаны с заполнением погребений.

На хроматограммах в центре курганов, как правило, фиксировался м-ксилол в очень небольших количествах вплоть до следов, а кумол присутствовал исключительно в виде следов или его не было совсем. Стоит отметить, что в измерениях проб, отобранных за контуром кургана, отсутствовали даже его следы. Такие значения опорных для данных исследований веществ можно объяснить тем, что низкие температуры под каменной насыпью препятствуют формированию ореола рассеяния углеводородов.

АРХЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проведения археологических исследований было выбрано по одному объекту из трех курганных комплексов, где геофизические результаты указывали на наличие мерзлоты: курган 1 могильника Улан-Даба-1, курган 2 могильника Олон-Курин-Гол-6, курган 1 могильника Олон-Курин-Гол-10. Также раскопкам подвергся курган 2 могильника Олон-Курин-Гол-7, где геофизическая разведка не проводилась.

Раскопки 2006 г. подтвердили присутствие мерзлотных образований во всех трех объектах, выделенных по результатам геофизической диагностики. Однако природа и масштабы этих образований оказались различными. Наиболее яркой в количественном и качественном выражении была аномалия на кургане 1 Улан-Даба-1 (см. рис. 7, а). Там специально для выявления источника аномалии был прокопан шурф размером 4 × 3.5 м (см. рис. 7, б). Действительно, линза мерзлоты была обнаружена на глубине 2—2.5 м в ненарушенных слоях, подстилающих курган. Однако причины ее образования были естественными: на каменном цоколе при подвижках моренных или селевых потоков образовался своеобразный карман из валунов и обломочного каменного материала, в котором и аккумуляровалась вода, впоследствии превратившаяся в лед.

В кургане 2 могильника Олон-Курин-Гол-6 мерзлый грунт также фиксировался в могильной яме и в заполнении сруба, но, кроме того, внутри сруба вдоль северной его стенки находилась узкая линза чистого льда. Ее положение хорошо коррелируется с отмеченным геофизическими методами смещением непроводящей аномалии в северную часть ямы (см. рис. 7, в, г).

Наконец, в кургане могильника Олон-Курин-Гол-10, где обнаружено непо потревоженное захоронение воина, мерзлота присутствовала в наибольшем масштабе и в различных видах (см. рис. 7, д, е). Промерзшим было заполнение могильной ямы вокруг сруба. Внутри сруба лед присутствовал в северной части. Кроме того, на грунтовой подсыпке под погребальным ложем образовался ледяной бугор почти по всей площади сруба, выдавивший доски вверх. Именно благодаря присутствию мерзлоты данное погребение со всем его содержимым отличала уникальная степень сохранности.

Итак, в результате археологической проверки установлено, что геофизические методики, применявшиеся для обнаружения льда в погребальных комплексах, полностью себя оправдали [Эпов и др., 2006].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением широкого комплекса геофизических и геохимических методов были изучены более двадцати пазырыкских курганов. Показана высокая эффективность методов сопротивления и частотного зондирования при выделении в курганах мощных аномалий высокого удельного электрического сопротивления — ледовых линз.

Археологическими раскопками в Монголии полностью подтверждены комплексные геофизические прогнозы о наличии льда в курганах. Вместе с тем в кургане Улан-Даба выявлена предсказанная геофизически линза льда природного происхождения. Эти обстоятельства сформировали проблему идентификации не только льда, но еще и деревянных срубов под каменными насыпями курганов. Привлеченные геохимические методы позволили установить особенности листовенных срубов, типичных для высокогорных пазырыкских курганов, и пути их идентификации. Однако результаты требуют проведения последующих археологических изысканий для определения правильности выбранной методики и внесения необходимых корректировок.

В результате цикла экспериментальных, теоретических и верификационных работ была подтверждена эффективность комплексной геофизико-геохимической методики диагностики наличия линз мерзлоты и срубов из листовенницы в могильных камерах древних пазырыкских курганов. Необходимо также отметить, что подобные геофизические исследования на Укоке и в Монголии проводились впервые в мировой практике.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-06-00204, 09-06-10006), интеграционного проекта СО РАН № 16, государственного контракта № П1270 в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Балков Е.В., Манштейн А.К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании // Геофизический вестник, 2001, № 12, с. 17—20.

Балков Е.В., Манштейн А.К., Чемякина М.А., Манштейн Ю.А., Эпов М.И. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач // Геофизика, 2006, № 1, с. 43—50.

Ковбасов К.В. Математическое моделирование электрического поля в неоднородной среде на неструктурированной сетке (задача археологии) // Сборник научных трудов НГТУ, 2006, т. 1, № 43, с. 19—25.

Кубарев В.Д. Курганы Уландрыка. Новосибирск, Наука, 1987, 302 с.

Кубарев В.Д. Курганы Юстыда. Новосибирск, Наука, 1991, 270 с.

Молодин В.И., Парцингер Г., Гаркуша Ю.Н., Шнеевайс Й., Беккер Х., Фассбиндер Й., Чемякина М.А., Гришин А.Е., Новикова О.И., Ефремова Н.С., Манштейн А.К., Дядьков П.Г., Васильев С.К., Мыльникова Л.Н., Балков Е.В. Археолого-геофизические исследования городища переходного от бронзы к железу времени Чича-1 в Барабинской лесостепи. Первые результаты Российской-Германской экспедиции // Археология, этнография и антропология Евразии. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2001, № 3, с. 104—127.

Молодин В.И., Полосьмак Н.В., Новиков А.В., Богданов Е.С., Черемисин Д.В., Слюсаренко И.Ю. Археологические памятники плоскогорья Укок (Горный Алтай) // Материалы по археологии Сибири. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2004, вып. 3, 256 с.

Полосьмак Н.В. Всадники Укока. Новосибирск, ИНФОЛИОпресс, 2001, 336 с.

Тишкин А.А., Дашковский П.К. Социальная структура и система мировоззрений населения Алтая скифской эпохи. Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2003, 430 с.

Феномен алтайских мумий / Ред. А.П. Деревянко. Новосибирск, Изд-во СО РАН 2000, 318 с.

Эпов М.И., Чемякина М.А., Манштейн А.К., Дядьков П.Г., Парцингер Г., Молодин В.И., Балков Е.В. Геофизические исследования городища Чича-1 в 2000 году // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2000, с. 447—456.

Эпов М.И., Манштейн А.К., Молодин В.И., Парцингер Г., Чемякина М.А., Манштейн Ю.А., Балков Е.В. В поисках мерзлоты (результаты геофизических исследований курганных могильников на плато Укок) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Т. IX. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2003, с. 528—534.

Эпов М.И., Молодин В.И., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Балков Е.В., Чемякина М.А., Шурина Э.П., Ковбасов К.В. Геофизические исследования археологических памятников в Северо-Западной Монголии в 2005 г. // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Т. XI. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2005, с. 503—508.

Эпов М.И., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Чемякина М.А., Балков Е.В., Молодин В.И., Слюсаренко И.Ю. Электроразведочное картирование «замерзших» пазырыкских курганов Алтая // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Т. XII. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2006, с. 510—515.

Эпов М.И., Молодин В.И., Каюров К.Н., Чемякина М.А., Манштейн А.К., Сухорукова К.В., Напрев Д.В., Адайкин А.А. Геофизическая диагностика структуры «замерзших» курганов Укока, новые горизонты // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Т. XIII. Новосибирск, ИАЭТ СО РАН, 2007, с. 407—412.

Эпов М.И., Молодин В.И., Чемякина М.А. Диагностика структуры «замерзших» курганов пазырыкской культуры Алтая геофизическими и геохимическими методами // Труды II (XVIII) Всероссийского археологического съезда в Суздале. Т. III. М., ИА РАН, 2008, с. 416—419.

*Рекомендована к печати 28 января 2011 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
17 января 2011 г.*