

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

УДК 621.396.969.1:637.652:569.614(282.256.86)



Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны

И.В. Горохов¹, И.И. Христофоров^{1,2✉}, К.П. Данилов^{1,2}, Е.С. Петухова¹

¹ ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

✉ khristoforov@mpi.ysn.ru

ИД ИВГ, 0000-0001-6142-0103; ИИХ, 0000-0003-2478-4172; КПД, 0000-0003-3558-9655; ЕСП, 0000-0002-2091-725X

Аннотация. Исследования, описанные в данной работе, направлены на развитие георадиолокационного метода для поиска подводных местонахождений бивней мамонта. Затронута актуальность данного биогенного ресурса, а также выделены проблемы, связанные с его освоением. Геофизические работы выполнены в Арктической зоне Республики Саха (Якутия), на участке среднего течения реки Колымы в осенний период. Исследования проведены георадарной аппаратурой ОКО-3 с антенным блоком с частотой 150 МГц. Представлены результаты площадной георадиолокационной съемки в виде карты глубин и георадарных разрезов. Проанализирована эффективность применения метода георадиолокации при поисковых работах на местонахождениях подводных скоплений бивней мамонта. Предложены методические рекомендации внедрения метода георадиолокации в поисковые работы.

Ключевые слова: Арктика, бивни мамонта, георадиолокационное зондирование, донные отложения, криолитозона, местонахождения ископаемой мамонтовой кости, река Колыма, Республика Саха (Якутия)

Для цитирования: Горохов И.В., Христофоров И.И., Данилов К.П., Петухова Е.С. Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):74–86. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

Поступила 13.09.2024

После переработки 21.10.2024

Принята 23.10.2024

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Full-scale modelling of GPR sounding of Kolyma River bottom in searching for bone remains of mammoth fauna animals

Ivan V. Gorokhov¹, Ivan I. Khristoforov^{1,2✉}, Kencheri P. Danilov^{1,2},
Evgenia S. Petukhova¹

¹ FRC “The Yakut Scientific Centre of the SB RAS”, Yakutsk, Russia

² Melnikov permafrost institute SB RAS, Yakutsk, Russia

✉khristoforov@mpi.ysn.ru

IVG, 0000-0001-6142-0103; IIK, 0000-0003-2478-4172; KPD, 0000-0003-3558-9655;
ESP, 0000-0002-2091-725X

Abstract. The fossil mammoth tusk is a unique biogenic material, which is widely used for the production of souvenirs and luxury goods. The burial of mammoth fauna animal's remains in permafrost ensured high preservation. Due to the complete ban on hunting African and Asian elephants introduced in 1990 by UNESCO, the demand for fossil ivory has increased. Today, up to 80 % of mammoth bone deposits is harvested in the Republic of Sakha (Yakutia), Russia. The paper describes some traditional techniques of mammoth tusk mining and proves the efficiency of the GPR (ground penetrating radar) for prospecting underwater accumulations of fossil mammoth bone. The aim of the survey was increasing the efficiency of the GPR sounding technique for the detection of mammoth bone under water. The comprehensive GPR area survey was used to identify areas promising to contain underwater accumulations of fossil mammoth bone. Because the release of bone material from productive layers is caused by river erosion and thermal erosion processes a meandering section of the Kolyma River was selected for the research. Thermal erosion plays a more prominent role in the release of bone material in the headwaters of small watercourses, in deltas, and in the bottoms of incipient gullies. Fossil mammoth bones are usually found on riverbanks (low floodplain, channel spits) — in areas where the river erodes the slopes of remnants composed of edomorphic complex formations or in close proximity to them. The GPR application makes it possible to study the bottom relief in detail and thus can identify areas promising in terms of the formation of secondary accumulations of mammoth bones. The key features of bone remain accumulations have been identified: natural depressions or obstacles that mammoth bone can get caught on when sinking to the bottom of the water body; accumulation of the heaviest fragments in the deepest depressions at the bottom of the water body; accumulation of smaller fragments on sedimentary shoals. An algorithm for the GPR surveying of water bodies promising in terms of mammoth bone detection has been developed.

Keywords: Arctic, bottom sediments, cryolithozone, GPR sounding, Kolyma River, locations of fossil mammoth bones, mammoth tusks, Republic of Sakha (Yakutia)

For citation: Gorokhov I.V., Khristoforov I.I., Danilov K.P., Petukhova E.S. Full-scale modelling of GPR sounding of Kolyma River bottom in searching for bone remains of mammoth fauna animals. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):74–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

Received 13.09.2024

Revised 21.10.2024

Accepted 23.10.2024

Введение

Ископаемая мамонтовая кость (ИМК) — уникальное биогенное сырье, нашедшее широкое применение на рынке сувенирной и ювелирной продукции как аналог слоновой кости. В настоящее время до 80 % ИМК добывают в арктической части территории Республики Саха (Якутия) (РС(Я)). Ежегодные объемы добычи за период с 2013 по 2021 г., согласно данным Федерального агентства по недропользованию Минприроды России (Роснедра) и Министерства промышленности и геологии Республики Саха (Якутия), повысились с 20,3 до 159,6 т/год. Высокая востребованность ископаемых бивней, обусловленная полным запретом на охоту на

современных слонов [1], привела к стремительному развитию частной добывающей промышленности ископаемой мамонтовой кости, а также активному внедрению различных современных технологий для наиболее эффективного поиска новых местонахождений и обследования ранее освоенных костеносных участков.

На сегодняшний день технологии разработки местонахождений ИМК не встречаются в патентных источниках. Однако в научных трудах А.Н. Смирнова, Н.Д. Кириллина, Р.Р. Ноговицына [1, 2] подробно описаны подготовительные, поисковые и промысловые работы, связанные со сбором вышедших на дневную поверхность ИМК, без существенного нарушения целостности недр. Лишь в некоторых случаях, при появлении прямых признаков («свежие» костные и трупные остатки, наличие одного свежего бивня из пары и т. д.), могут проводиться «горные» работы с применением механических способов перемещения горной массы. Оптимальный комплекс методов поиска включает наземное и водное обследование береговой зоны рек, озер по определенному маршруту с применением вездеходной и наводной техники, обеспечивающей визуальное наблюдение всей поверхности исследуемой территории, перспективной для обнаружения экспонированных на дневную поверхность ИМК и других костных остатков. В некоторых случаях может применяться аэровизуальное наблюдение с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [3, 4]. При поиске на дне водоемов или поднятии обнаруженных бивней с глубины применяют акваланги и гидрокостюмы. Для обнаружения бивней на небольшой глубине, как и при наземном поиске, применяют штыковой способ, с использованием металлической трости [5].

Опыт зарубежных и отечественных исследователей в области палеонтологии показал, что из обширного арсенала геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых для обнаружения костных и трупных остатков эффективны лишь некоторые вариации основных базисных методов. Так, в работе [6] показана возможность оконтуривания трупных остатков мамонтовой фауны с использованием электротомографии. Удельное электрическое сопротивление трупного остатка имеет отличное от вмещающих мерзлых пород значение, что создает контраст на фоне мерзлого грунта, однако эффективность оконтуривания существенно зависит от размеров и сохранности туши. Помимо методов электроразведки, в литературе описан опыт применения метода гидролокации, основанный на измерении акустических волн при поиске подводных скоплений ИМК [7]. Безусловно, данный метод перспективен для поиска бивней и крупных костей за счет возможности обнаружения инородных тел на поверхности дна и в маломощных донных отложениях, в том числе на высокоминерализованных водных объектах. Однако существенным недостатком гидролокаторов бокового обзора в рамках исследований, проводимых на пресноводных водоемах Арктики, является сложность в определении абсолютных высот структурных элементов рельефа дна, а также глубины залегания обнаруженных объектов, а с учетом мощности донных отложений, которая может превышать 6 м, применение данного метода будет малоэффективным.

Среди других методов геофизики для поиска ИМК наиболее распространен и подкреплен практическим опытом метод георадиолокации. В частности, в работе С.П. Лукьянова [8] обоснована эффективность применения георадиолокационного метода в палеонтологии, а в публикации Н.В. Керемясова [5] кратко упоминается возможность применения георадаров при поиске ИМК. В зарубежной литературе

также встречаются единичные работы, связанные с однократным применением георадаров, где показана их эффективность при картировании аномалий скелетных остатков позднелейстоценового мамонта, замороженного во льду [9].

В таблице произведена обобщенная сравнительная оценка эффективности различных методов поиска остатков животных мамонтовой фауны.

Таблица

Способы и методы поиска бивней мамонта

Table

Mammoth bone prospecting techniques

Способы и методы	Суть метода	Преимущества	Недостатки
Наземный пеший поиск	Поиск ведется бригадами, на перспективных участках (береговые зоны, кладбища). Пешие маршруты. Возможно применение щупов	Простота и низкая стоимость работ. Возможность ведения работ на любых участках, где может пройти человек	Максимум трудозатрат на минимум площади. При обнаружении бивней возникает проблема транспортировки
Наземный поиск с применением различных видов транспорта	Поиски ведутся с применением транспортных средств и верховых животных	Большое покрытие площади опоскования. При обнаружении есть возможность погрузки сырья на транспорт	Поиск возможен на проходимых для транспорта участках. Затраты на топливо
Водный и подводный поиск	Визуальный поиск с применением подводных камер, дронов. При подводном поиске применяются также гидрокостюмы и акваланги	Высокая вероятность обнаружения ИМК ввиду малой освоенности акваторий. Покрытие больших площадей исследования	Дорогое оборудование, необходимость обучения дайверов навыкам погружения
Аэропоиск	Использование квадрокоптеров с телефотоаппаратурой для поиска вдоль русел рек, на побережьях озер и морей и любых труднодоступных участках экспонированных бивней	Экономия времени. Возможность проведения поиска на труднодоступных и опасных участках, таких как обрывы, крутые склоны и т. д.	Возможность обнаружения только крупных объектов, частично или полностью экспонированных. Непродолжительность работ из-за необходимости заряжать устройство
Геофизические методы поиска	Использование современных неразрушающих геофизических методов для обнаружения и оконтуривания крупных скоплений ИМК под землей и под водой	Неразрушающие методы без ущерба для экологии. Вероятность обнаружения совершенно новых захоронений и скоплений костных остатков	На данный момент геофизические методы поиска остатков животных мамонтовой фауны находятся на стадии экспериментальных и опытно-методических работ

Существует достаточно эффективный способ поиска и добычи мамонтовых бивней и костных остатков териофауны мамонтового комплекса в криогенных отложениях позднего плейстоцена — первичных костеносных коллекторах (едомная свита). Поиски и добыча осуществляются путем размывания многолетнемерзлых пород водой с помощью гидромониторов высокого давления. Данный способ, иногда незаконно используемый недропользователями, законодательно запрещен, поскольку ведет к непосредственному разрушению толщ многолетнемерзлых пород и последующей активизации термоэрозийных процессов (Закон Республики Саха (Якутия) от 22 мая 2018 г. 2006-З № 1571-V «Об охране вечной мерзлоты в Республике Саха/Якутия»).

Статистика сбора ИМК свидетельствует о том, что наиболее перспективными для поиска являются прибрежные территории водных объектов суши. Немаловажной в данном случае является доступность данных участков при использовании наводного транспорта, тогда как автотранспортная инфраструктура территории арктических районов РС(Я) практически отсутствует или слабо развита. С учетом запрета в законодательстве РС(Я)¹ на шахтный вид поиска с использованием мотопомп высокого давления, ведущего к искусственному разрушению многолетнемерзлых пород, наиболее перспективным представляется поиск и сбор ИМК со дна водоемов. Данный вид промысла не наносит вреда экологии и допустим согласно требованиям существующего законодательства на попутный сбор. В связи с этим необходимо решение задач по раскрытию потенциала продуктивности россыпных скоплений ИМК на дне и в донных отложениях водных объектов суши.

Водоемы Арктики характеризуются достаточно высокой мутностью воды и наличием донных отложений, мощность которых может составлять 1–6 м и более. С учетом протяженности участков местонахождений, которая может составлять от сотни метров до десятка километров, достаточно большой глубины водоемов и наличия донных отложений, наиболее эффективным и продуктивным методом для поиска подводных скоплений ИМК является георадиолокация. Таким образом, разработка и совершенствование георадиолокационного метода поиска ИМК на дне и в донных отложениях рек и озер криолитозоны в целом является актуальной задачей для повышения результативности добычи и уменьшения негативного влияния добычи на окружающую среду. В рамках данной работы целью исследований является изучение строения дна методом георадиолокации для выделения геоморфологических признаков для обнаружения и распознавания ИМК на дне пресноводных водоемов Арктики.

Материалы и методы исследования

В речных долинах находки бивней в основном фиксируются на меандрирующих участках рек, где происходит более интенсивное разрушение береговых склонов. Следует отметить, что высвобождение костного материала из продуктивных отложений происходит не только за счет речной эрозии, но и за счет протекания термоэрозийных процессов: береговые склоны нередко характеризуются наличием

¹ Распоряжение Главы РС(Я) от 13 августа 2018 г. № 649-РГ «Об утверждении Концепции развития сбора, изучения, использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны на территории Республики Саха (Якутия)». URL: <http://docs.cntd.ru/document/550166534>

ем оплывин, сползанием участков склонов и иными проявлениями солифлюкции. Термоэрозия играет более заметную роль в высвобождении костного материала в верховьях мелких водотоков, в делях, в днищах зарождающихся оврагов.

Исследования проводились на р. Колыме, известной своими богатыми запасами ИМК. Работа выполнялась в осенний период, характеризующийся наиболее интенсивным протеканием эрозионного цикла. Участок, представляющий собой часть излучины с сильным течением, расположен на акватории среднего течения р. Колымы. При георадарном профилировании охвачена наиболее крутая часть излучины с размытыми береговыми склонами (рис. 1). Впадающий на данном участке в р. Колыму руч. Мангазейка способствует усилению эрозионных процессов, что должно приводить к высвобождению большего количества костного материала из эродируемых вмещающих пород.

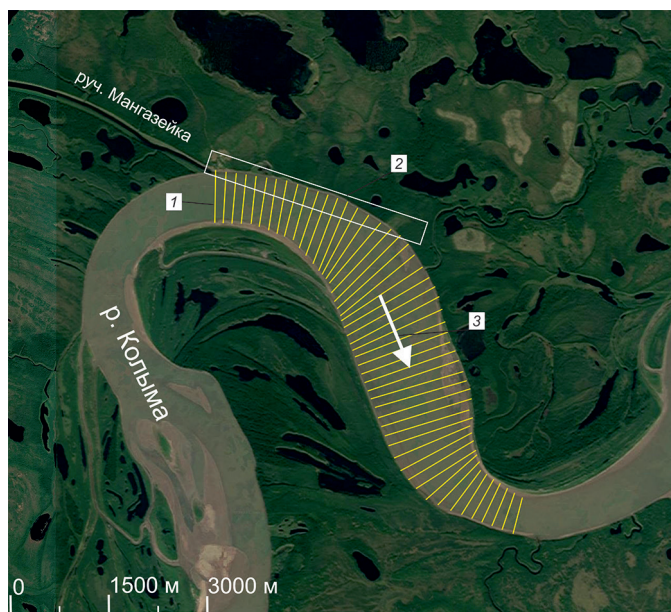


Рис. 1. Карта ключевого участка исследования.

1 — профили площадной георадарной съемки; 2 — область с размытыми береговыми склонами; 3 — направление течения р. Колымы

Fig. 1. Survey area on the map.

1 — the comprehensive GPR area survey; 2 — an area with blurred coastal slopes; 3 — the direction of the river flow

Для картирования потенциальных участков подводных скоплений ИМК использована площадная георадарная съемка, по результатам которой построена карта глубин, изучена общая картина рельефа дна и зарегистрированы сигналы от локальных объектов, находящихся на поверхности дна и в донных отложениях. Для измерений применялся георадар серии ОКО-3 компании ООО «Логис-ГЕОТЕХ» с центральной частотой антенного блока 150 МГц. Исследования с поверхности воды осуществлялись при комплексном применении двух лодок, закрепленных по бортам натяжным способом. Судно-буксир необходимо для размещения водителя судна с навигатором и оператора с блоком управления и блоком регистрации гео-

радар. Буксируемая ПВХ-лодка использована для размещения антенного блока, обеспечения гермозащиты, а также для уменьшения влияния сигналов-помех, вызванных металлической конструкцией судна-буксира. Расстояние между профилями составляло 80–100 м, в зависимости от погодных и территориальных условий, а именно — угла направления на поворотах реки. Данный шаг площадной съемки обусловлен задачей по исследованию рельефа дна и выявлению морфологических признаков локализации бивней мамонта. На основе карты глубин в последующем будут выбраны перспективные участки и проведены дополнительные поисковые работы с меньшим расстоянием между профилями и антеннами с разными центральными частотами. Для соблюдения равномерного хода судна, при необходимой скорости 3 км/ч, а также точности направления в процессе записи георадарных профилей применен спутниковый навигатор GPS, на котором отмечались начальные, конечные и промежуточные точки пройденных профилей. Данные координаты необходимы на стадии обработки и интерпретации данных для корректировки пройденного расстояния и фактического направления и расположения профилей на карте для повышения точности привязки георадарных данных к реальному рельефу дна. Всего за полевые работы с водной поверхности на исследуемой площади было получено 50 профилей. При средней протяженности профиля 800–1000 м и расстоянии между профилями ≈ 100 м, общая исследованная площадь составила около 5 кв. км и 45 тысяч пог. м.

Обработка и интерпретация данных производились с использованием программных ресурсов GeoScan32, Excel, SasPlanet и Surfer и учитывали географические координатные данные начальных, конечных и промежуточных точек привязки, зафиксированных с использованием GPS-навигатора. Среднее значение диэлектрической проницаемости при зондировании с поверхности воды составило 81 [10]. Накопление сигналов георадара выставлено равным 16, для этого значения оптимизирована постоянная скорость продвижения георадара (10 км/ч) с расчетом детальности — не менее 20 зондирований на каждый метр. Использование методических особенностей георадарного метода, выработанных авторами статьи ранее [11], позволило эффективно исследовать водоемы суши, расположенные в условиях вечной мерзлоты, на глубину до 16 м. Для участков, глубина которых превышала 16 м, для построения карты глубин на радарограммах граница рельефа дна проинтерполирована до глубины 20 м.

В процессе зондирования и последующей интерпретации данных учитывался опыт применения георадаров при поиске ИМК с поверхности воды [12]. Так, на рис. 2 представлен характерный сигнал, отраженный от бивня мамонта (рис. 2а), искусственно помещенного на дно пресноводного водоема². Отраженный сигнал от бивня характеризуется отрицательной фазой вступления в отличие от сигнала, отраженного от влагонасыщенного ствола дерева (рис. 2б), находящегося в естественном залегании. Следует отметить, что представленные характеристики сигналов получены в результате натурного эксперимента, целью которого были анализ и сравнение спектральных характеристик сигналов, зарегистрированных от объектов различной природы, находящихся под водой.

² Христофоров И.И., Горохов И.В., Данилов К.П., Чепрасов М.Ю., Петрова Т.Н., Петухова Е.С. Особенности гидрорадиолокации костей и бивней мамонта. Четвертичная палеонтология и палеоэкология Якутии: Материалы международного научного семинара, посвященного 85-летию со дня рождения известного ученого-палеонтолога, д-ра биол. наук П.А. Лазарева (1936–2011). Якутск, 2021: 86–90.

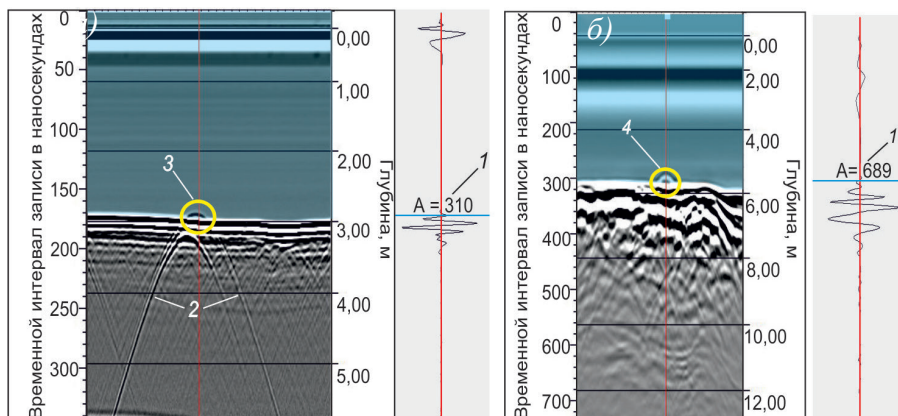


Рис. 2. Радарограммы отраженных сигналов от подводных объектов различной природы.

a — радарограмма ИМК; *б* — радарограмма ствола дерева; *1* — амплитуда отраженного сигнала; *2* — усы гиперболы, зарегистрированные при зондировании ИМК; *3* — дифрагированный сигнал ИМК; *4* — дифрагированный сигнал ствола дерева

Fig. 2. Radar images of reflected signals from underwater objects of different materials.

a — radar image of mammoth bone; *б* — radar image of trunk tree; *1* — the amplitude of the reflected signal; *2* — the whiskers of the hyperbole recorded during the probing of the tusk; *3* — the diffracted signal of the tusk; *4* — the diffracted signal of the tree

Результаты и обсуждение

ИМК встречаются обычно на речных отмелях (низкая пойма, русловые косы) — на участках, где река размывает склоны останцов, сложенных образованиями едомного комплекса, или в непосредственной близости от них. Иными словами: переотложенные в речных долинах ИМК — материал ближайшего сноса. На рис. 3 представлена схема накопления бивней на дне рек, разработанная Н.Д. Ки-

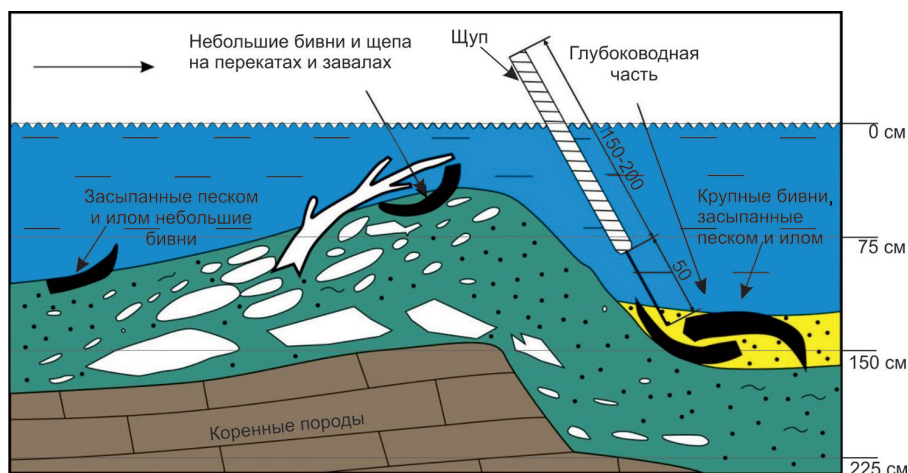


Рис. 3. Схематический профиль реки, благоприятные места залегания ИМК на дне и их обнаружение при помощи щупа. Адаптированная модель Н.Д. Кириллина [13]

Fig. 3. Schematic profile of the river and favorable locations of BCI at the bottom and their detection using a probe. Adapted from N.D. Kirillin's paper [13]

риллинам [13]. Отмечается, что глубоководные части русел являются коллекторами крупных тяжелых бивней, в то время как более мелкие бивни залегают на перекатах и косах. Определяющим фактором в данном случае является гидродинамика водных потоков, обеспечивающих перемещение и переотложение обломочного материала в виде взвешенных и волоочильных наносов.

Визуальное обнаружение наиболее глубоких участков русла и подводных наносных отмелей затруднено, а проведение работ с использованием аквалангов и гидрокостюмов чрезвычайно трудоемко, затратно и осложнено высокой мутностью воды и интенсивным течением.

Применение метода георадиолокации позволяет достаточно подробно изучить рельеф дна и, соответственно, определить участки, наиболее перспективные для формирования скоплений ИМК и других костных остатков на основании следующих ключевых признаков:

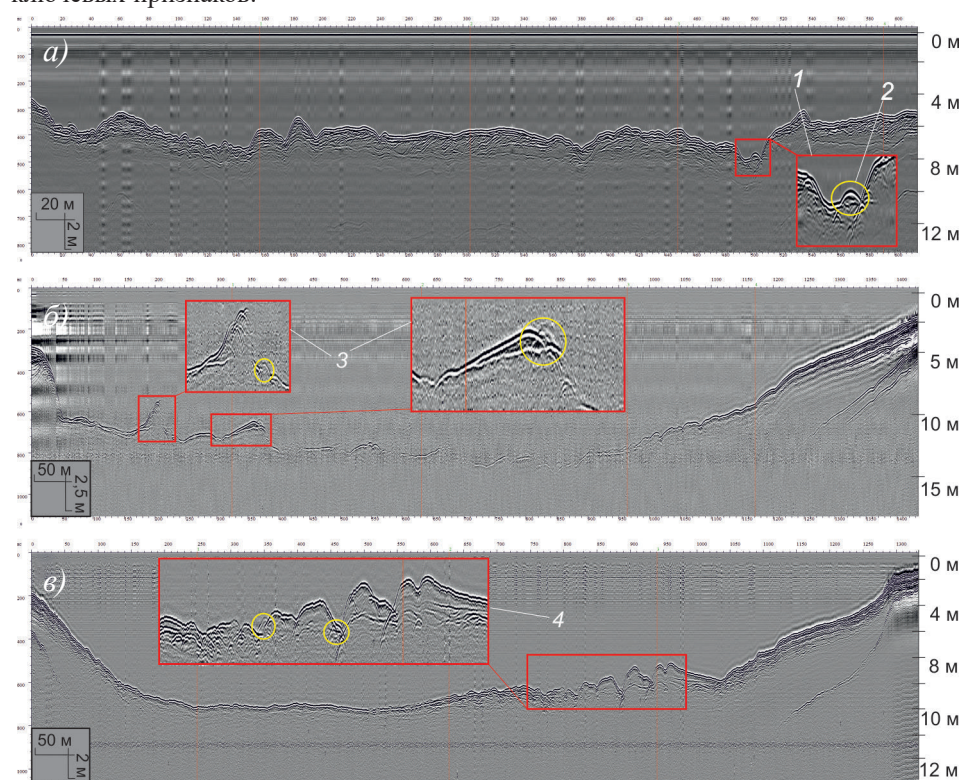


Рис. 4. Радарограммы с выявленными ключевыми признаками.

а — радарограмма с локальным объектом в естественном понижении рельефа дна; *б* — радарограмма с наносными повышениями в рельефе дна; *в* — радарограмма с донными отложениями с нарушенной структурой и локальными объектами внутри; 1 — естественное понижение рельефа дна; 2 — локальный объект; 3 — наносные повышения; 4 — донные отложения с нарушенной структурой

Fig. 4. Radar images with identified key signs of tusk detection.

a — a radar image with a local object in a natural decrease in the bottom relief; *b* — a radar image with alluvial increases in the bottom relief; *c* — radar image of bottom sediments with a disturbed structure and local objects inside; 1 — a natural decrease in the bottom relief; 2 — a local object; 3 — alluvial increases; 4 — bottom sediments with a disturbed structure

- наличие отраженных сигналов от локальных объектов, размеры и характеристики дифрагированных сигналов от которых сходны с характеристиками искомых объектов;

- наличие значительных понижений на дне водоема, служащих для костных остатков естественными ловушками;

- наличие наносных отмелей, выделяющихся на радарограмме в виде повышений рельефа дна с нарушенной структурой донных отложений.

Анализ радарограмм, полученных при площадной съемке, позволил выявить локальные объекты и характерные для аккумуляции бивней мамонта формы рельефа на дне изучаемого участка р. Колымы. Так, на рис. 4 представлены некоторые радарограммы исследуемого участка с выявленными морфологическими признаками перспективности участка на предмет обнаружения подводных скоплений ИМК.

Характерным для объекта на рис. 4а является его расположение в естественном углублении на дне изучаемого водоема. Такие сигналы могут быть зарегистрированы от бивней, перезахороненных в процессе русловых гидродинамических процессов. Наиболее высокая вероятность обнаружения искомого объекта появляется при регистрации отраженного сигнала вблизи подводной части берегового склона, когда выпавший из вмещающих пород незадолго до проведения георадиолокационной съемки объект под действием силы тяжести постепенно сползал по склону и задержался на естественном препятствии, а русловые процессы не успели переместить и перезахоронить объект.

Также на рисунках (см. рис. 4б, 4в) объекты расположены в донных отложениях с нарушенной структурой, что может свидетельствовать о том, что они длительное время находятся на дне водоема и под воздействием речного потока и силы тяжести были перезахоронены в более глубоководных частях дна реки.

Согласно полученным разрезам и имеющимся представлениям о наиболее перспективных условиях для обнаружения крупных ИМК, на рис. 5 представлена карта глубин, преобразованная с учетом расположения обнаруженных локальных объектов, а также предположительная динамическая модель характерных перемещений и захоронений костных остатков на дне изучаемого водоема.

Разрез А-Б характеризует предположительный характер накопления костных остатков при их выпадении из разрушающихся в результате термоэрозийных процессов береговых склонов, сложенных едомными отложениями. Костный объект, высвобождаясь из оттаявших пород под действием силы тяжести, постепенно опускается на дно, задерживаясь на естественных выступающих препятствиях. Русловые процессы, в особенности в период их сезонной интенсификации, обеспечивают перемещение бивней и их обломков, а также их перезахоронение в наиболее глубоководные части водоема, откуда их дальнейшее перемещение затруднено (Разрез I-II). Более мелкие обломки в свою очередь могут перезахороняться на отмелях вдоль течения реки. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования, представленными в [13] и на рис. 3.

Таким образом, при геофизическом обследовании пресноводных водоемов Арктики с целью поиска костных остатков животных мамонтовой фауны следует использовать ряд методических рекомендаций:

1. Оценить ранее выявленную продуктивность водного объекта и его обрамления.

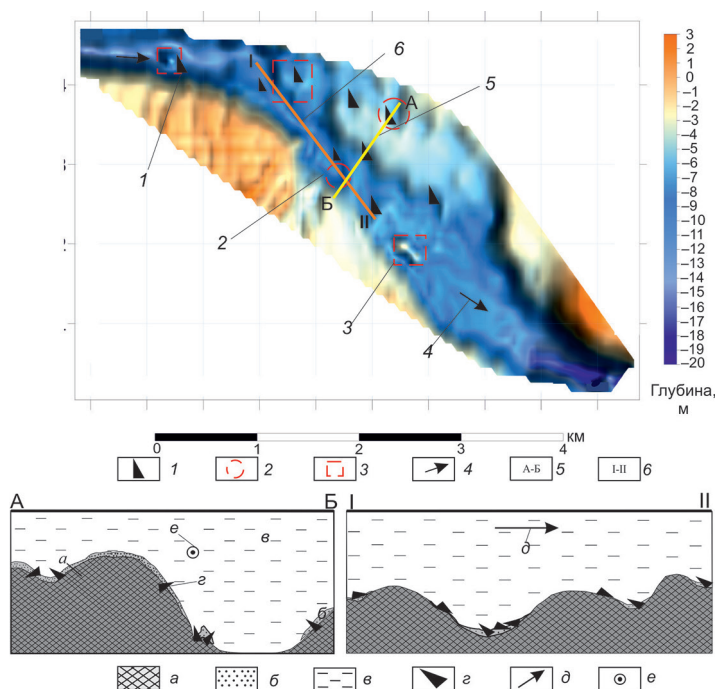


Рис. 5. Карта глубин с выявленными локальными объектами и условия их захоронения поперек и вдоль течения реки.

1 — зарегистрированные локальные объекты; 2 — естественные ловушки с понижениями в рельефе дна; 3 — наносные отмели; 4 — направление течения реки; 5 — поперечный разрез; 6 — продольный разрез; а — коренные породы; б — донные аллювиальные отложения; в — водный слой; з — предполагаемый характер залегания ИМК; д — направление течения на продольном разрезе; е — направление течения на поперечном разрезе

Fig. 5. Depth map with identified local objects and conditions for their burial across and along the river. 1 — registered local objects; 2 — natural traps with relief depressions; 3 — area with alluvial shoals; 4 — the direction of the river flow; 5 — a transverse section; 6 — a longitudinal section; а — bedrock; б — bottom alluvial deposits; в — water layer; з — the assumed nature of the occurrence of mammoth tusks; д — the direction of flow in the longitudinal section; е — the direction of the flow in the transverse section

2. Выявить основной источник поступления ИМК и обследовать подводную часть берегового склона.

3. Произвести площадную съемку, выявить локальные объекты, геофизические характеристики и размер которых сходны с искомым объектом.

4. Обследовать наиболее глубоководные части дна.

5. Выявить и обследовать подводные наносные отмели.

Безусловно, методические аспекты обработки и интерпретации данных георадиолокационного зондирования ИМК на дне пресноводных водоемов Арктики требуют дальнейшей детализации, включая возможность идентификации объектов различной природы, применения антенных блоков с другими частотами, разработки техники и программного обеспечения, доступных для применения недропользователями и т. д., что и будет являться предметом дальнейших изысканий авторов данной статьи.

Заключение

На примере проведенного исследования участка русла р. Колымы показана возможность применения метода георадолокации при поисковых работах, связанных с изучением условий локализации крупных костных остатков, включая ИМК, на дне и в толще донных отложений на глубину до 16 м при данном аппаратном комплексе. Определены параметры электромагнитных сигналов для антенного блока с центральной частотой 150 МГц, отраженных от искомым локальных объектов. Выделены ключевые признаки условий локализации скоплений костных остатков: естественные углубления или препятствия, способствующие их формированию; скопление наиболее тяжелых фрагментов в наиболее глубоководных углублениях на дне водоема; скопление более мелких фрагментов на наносных отмелях. Предложен алгоритм обследования перспективных для обнаружения ИМК водоемов, заключающийся в предварительном анализе перспективности местонахождения (были ли обнаружены ИМК ранее), выявлении продуктивного берегового склона, обследовании подводной части берегового склона, проведении площадной съемки с выявлением наиболее глубоководных участков, подводных наносных отмелей и локальных объектов поиска. Привязка показаний георадара к данным GPS-навигатора позволяет осуществить однозначную локализацию обнаруженных объектов, построить и верифицировать карту глубин, выделить перспективные для подводного сбора участки.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР № 122042000008-5.

Благодарности. Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation NIOKTR № 122042000008-5.

Acknowledgments. We express our gratitude to the Collective Use Center of the FRC Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for the opportunity to conduct research using the research equipment of the Center.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Смирнов А.Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в Российской Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007;4:21–29.
Smirnov A.N. The fossil ivory resource potential in the Russian Arctic. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2007;4:21–29. (In Russ.)
2. Кириллин Н.Д., Ноговицин Р.Р. Ископаемая мамонтовая кость — особый природный ресурс. *Наука и техника в Якутии*. 2010;1(18):19–23.
3. Петухова Е.С., Христофоров И.И., Чепрасов М.Ю., Нестерова Е.А., Горохов И.В., Данилов К.П., Боевский Г.Г., Протопопов А.В., Лыткин В.М. С дроном за мамонтами. *Природа*. 2023;7:3–19.
Petukhova E.S., Khristoforov I.I., Cheprasov M.Y., Nesterova E.A., Gorokhov I.V., Danilov K.P., Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Lytkin V.M. Chasing mammoths with a drone. *Priroda*. 2023;7:3–19. (In Russ.)
4. Смирнов А.Н., Калиновский К.К., Глинская Н.В., Дергачёва И.С., Калиновская М.А., Петров В.В. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов при поисках мамонтовых бивней в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):103–116.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116>

- Smirnov A.N., Kalinovskii K.K., Glinskaya N.V., Dergacheva I.S., Kalinovskaia M.A., Petrov V.V. Prospects of using unmanned aerial vehicles for detecting fossil mammoth ivory fields in the Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):103–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116>
5. Керемясов Н.В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости. *Вестник СВФУ*. Серия «Науки о земле». 2018;2(10):5–18.
Keremyasov N.V. Methods and technologies of fossil mammoth bone search. *NEFU Bulletin*. 2018;2(10):5–18. (In Russ.)
6. Оленченко В.В., Шеин А.Н. Возможности геофизических методов при поисках плейстоценовой мегафауны в пойменных и надпойменных отложениях реки Юрибей (Ямал). *Криосфера Земли*. 2013;17(2):83–92.
Olenchenko V.V., Shein A.N. Possibilities of geophysical methods in the search for pleistocene megafauna in floodplain and above floodplain deposits of the Yuribey river (Yamal). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(2):83–92. (In Russ.)
7. Смирнов А.Н., Калиновский К.К. Геологические предпосылки поисков подводных скоплений мамонтовых бивней методом гидролокации в российской Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2020;2:86–96. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96>
Smirnov A. N., Kalinovskiy K.K. Geological background to search underwater accumulations of mammoth ivory by sonar in the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and economy*. 2020;2:86–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96>.
8. Lukjanov S.P., Stepanov R.A., Chernyi I.A., Stukach O.V. Use of the ground penetrating radar methods for paleontology on example of the mammoth fauna investigation. *Proceedings of the 4th European Radar Conference, EURAD*. Munich: IEEE; 2007:468–471. <http://dx.doi.org/10.1109/EURAD.2007.4405039>
9. Urban T.M., Rasic J.T., Alix C., Anderson D.D., Manning S.W., Mason O.K., Tremayne A.H., Wolff C.B. The potential and pitfalls of ground-penetrating radar for archaeology in the Alaskan Arctic. *Remote Sensing*. 2016;8(12):1007. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8121007>
10. Владов М.Л., Пятилова А.М. Влияние водного слоя на глубинность георадиолокационных исследований на пресноводных акваториях. *Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология*. 2009;1:63–66.
Vladov M.L., Pyatilova A.M., Influence of the water layer on marginal valuation of the depth of ground penetrating radar researches in freshwater reservoirs. *Moscow State University Bulletin. Series 4. Geology*. 2009;1:63–66. (In Russ.)
11. Khristoforov I.I., Omelyanenko A.V. Improving the efficiency of hydrological investigations by submersible ground penetrating radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018;15(3):335–339. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2786858>
12. Khristoforov I.I., Danilov K.P., Gorokhov I.V., Cheprasov M.Y., Petrova T.N., Petukhova E.S. GPR sounding of fossil mammoth bones from the surface of freshwater lakes and rivers. *17th Conference on Engineering and Mining Geophysics 2021, April 26–30, 2021, Gelendzhik, Russia*. Curran Associates, Inc.; 2021. P. 1281–1290. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152205>
13. Кириллин Н.Д. Ископаемая мамонтовая кость — особый геокриогенный природный ресурс севера России: проблемы права, экономики и организация рационального пользования. Якутск: Академия наук Республики Саха (Якутия), ООО «Компания «Дани АлмаС»; 2011.192 с.