

Челябинский метеорит

В марте 2013 г. мы проводили георадарную съемку места падения осколка Челябинского метеорита в озеро Чебаркуль. По сути дела, это была та же задача, что стояла перед нами в Тунгусской тайге. Рассказ о чебаркульской экспедиции также включен в книжку, поскольку показывает возможности прибора по обнаружению неоднородностей в подземной и подводной среде, появившихся в результате падения космического тела.

Пестрое озеро — так с башкирского переводится название озера Чебаркуль. Одновременно это и название небольшого городка с двадцатитысячным населением на его берегу. Он возник как крепость еще до основания Челябинска, но ему не повезло — его сжег Емельян Пугачев. Когда Пугачев входил в крепость — его встретили хлебом-солью. Когда он ушел и на его место пришли царские войска, их тоже встретили хлебом-солью.

Потом войска ушли, Емельян Пугачев снова вернулся в Чебаркуль, и велел его сжечь. Заверения местного населения, что они люди мирные и что готовы служить любой власти, не помогли.

Метеорит взорвался над Еманжелинском 15 февраля 2013 г. От него отделился осколок, который упал в озеро Чебаркуль.

Осколок не дотянул до противоположного берега метров двести. Образовалась полынья шесть на восемь метров.

В СМИ появились сообщения, что в полынью под воду спускались водолазы, но ничего увидеть не смогли — многометровый слой ила-сапропеля не позволяет видеть дно. Только ногами чувствовали какие-то ямы. Возникла мысль, что мы со своей аппаратурой можем быть полезными в поисках подводных кратеров метеорита.

Экспедиция 11-15 марта 2013 г. была по организации одной из лучших, в которых мне приходилось участвовать. Никаких задержек не было: аэропорт, два часа пути на «Серебристом соболе» (так называл свой микроавтобус водитель), гостиница.

Хотя после падения метеорита прошел месяц, но эта тема еще не угасла: любой человек, начиная с водителя, с энтузиазмом рассказывает, где он в это время был и что видел.

Наутро встреча с главой администрации Андреем Орловым. Он нам рассказал о состоянии проблемы, показал найденные на льду мелкие осколки метеорита, представил своих сотрудников, которые обеспечат доставку нас с аппаратурой к полынье и горячее питание в процессе работы.

Также сообщил, что сам лично спускался на дно в подводном снаряжении:

- Ничего не видно. Плотный ил.

От гаража администрации «буханка» до гостиницы, погрузка аппаратуры. Подъехали к довольно старому деревянному зданию яхт-клуба на берегу, похожему на обычный деревенский дом: крылечко с перилами, застекленная с двух сторон веранда. По стенам внутреннего помещения батареи отопления от расположенной на кухне печи. В одной из комнат штабель ящиков со старыми подводными дыхательными аппаратами советского производства, которые используются в московском клубе «Акванавт» в качестве музейных реликвий. Имеющимся количеством можно было бы оснастить еще целый ряд музейных экспозиций.

Потом два с половиной километра на снегоходе до деревянных столбов, отмечающих положение уже замерзшей и занесенной снегом полыньи.

Когда перед поездкой на снегоходе увидел снежную поверхность озера, понял, что здесь очень быгодились валенки. В яхтклубе валенки нашлись, но дырявые, и мне предложили еще калоши. Калоши были на несколько размеров больше, поэтому пришлось, дополнительно, их прикрепить к сапогам проволокой, пропустив ее под ступней и обвязав голенище.

Первый профиль сделали от полыньи до берега. Пока шли по утопанному снегу, калоши вели себя нормально. Но только мы стали проваливаться под наст, дело пошло хуже — калоши непрерывно сваливались и терялись. Когда повернули от берега, возле полыньи уже стояли люди с двумя телевизионными камерами, нацеленными на нас. Процесс поиска и надевания калош был зафиксирован на видео для истории. Потом мы давали интервью двум местным телекомпаниям.

Следующие два дня работал в ботинках. Дополнительный толстый шерстяной носок неплохо защищал от холода, также как и «термобелье», одетое под джинсы. Конечно, это не ватные штаны, в которых можно запросто сидеть на снегу, и даже не армейские каль-

соны, но когда работаешь — не холодно. Правда, останавливаться нельзя, поскольку обмундирование тепло все-таки пропускает. Это приводит к тому, что ноги покрываются снежно-ледяными «сапогами». Но это даже не плохо, поскольку снег не попадает в ботинки, когда в него проваливаешься.

Перед тем, как снять обувь в яхтклубе, приходится какое-то время ждать, когда джинсы начнут сгибаться.

Алексей Попов два раза проваливался ногой в замаскированные снегом проруби, сделанные предыдущими изыскателями. Разувался, выжимал носки, но возвращаться на берег отказывался.

На третий день поднялся ветер. В. Алексеев опустил уши своей зимнего вида кепки. У Сергея был башлык, у Алексея настоящая шапка —ушанка, а у меня вязаная шапочка, которая продувалась насквозь. Но в яхтклубе нашелся шлем для поездок на снегоходах, в котором я чувствовал себя как у Христа за пазухой.

У нас был набор антенн различной длины. В мощности передатчика и чувствительности приемника мы не сомневались, но от поверхности снега, на которой лежат антенны, до поверхности воды подо льдом более полутора метров, что может привести к резонансным явлениям и «запиранию» энергии волны в слоях снега и льда. Ситуация на озере, пожалуй, самая сложная для георадара. Сделали годограф полутораметровыми антеннами и убедились, что видим только слои снега и льда. Радиоволны в воду практически не проникают. Потом работали только трехметровыми и шестиметровыми антеннами, на которых отражения от дна фиксировались.

Делая экспресс-анализ результатов первого дня георадарной съемки, обратили внимание, что в воде, между льдом и границей ила, в некоторых местах над ямами наблюдается какой-то объект, плотно примыкающий ко льду, большого объема, от которого отражается диффузный сигнал. Что это такое, долго понять не могли, пока Алексею Попову, уже в гостинице, перед сном, не пришла в голову мысль:

- Одна из загадок Чебаркуля — исчезновение льда из полыньи.

- Метеорит захватил его с собой! Ударной волной его забросило под воду! Потом он всплыл над кратерами, которых на дне несколько. Этот раздробленный лед мы и видим!

На второй день наших георадарных съемок на полынье уже сидел «рыболов» Миша из Челябинска:

- Дошло до того, что дома все метеориты кончились, даже подарить друзьям нечего. Приехал ловить.

Упавший метеорит относится к типу хондритов, в них есть железо, поэтому они прилипают к магниту. Уральский умелец показал оснастку своей удочки, где вместо крючка были привязаны четыре круглых магнита:

- Мощная штука! Из Москвы по почте выписал. Видите, один расколот? Это они прыгнули друг к другу! Я чуть пальца не лишился! Связка выдерживает девяносто килограммов!

Почти каждый заброс удочки приносил результаты. Себе Миша взял самые крупные куски, я, Алексей Попов и Сергей Меркулов по кусочку, Владимир Алексеев забрал все остальное:

- Для науки. Я и ваши кусочки опишу.

В гостинице он отбирал их у нас и уходил к себе в номер.

В последний, третий день, работали шестиметровыми антеннами по большой площади, начинавшейся с запада и захватывающей полыню. Сергей Меркулов передо мной и Алексеем Поповым (мы таскали антенны, а сам он работал с прибором) поставил задачу:

- Делаем профили до тех пор, пока не оконтурим большую яму. Для «три дэ» нужно, чтобы мы из нее вышли.

Наши георадарные съемки на озере Чебаркуль закончились словами С. Меркулова:

- Радуйтесь! Все, яма кончилась!

Собрали аппаратуру, а в это время снегоход Жени Королькова «дал клина». Были вызваны еще два снегохода, но пришел только один — второй куда-то провалился, в прямом смысле этого слова, и его сейчас оттуда вытаскивают. Отправили Сергея с аппаратурой на берег, а сами с Алексеем Поповым пошли пешком, чтобы не замерзнуть. Дорога, проложенная снегоходом, часто проваливалась, идти было трудно.

У шестиметровых резистивно-нагруженных дипольных антенн центральная частота равна 25 мегагерцам. Сигналы этого диапазона часто имеют характерную форму: привычные для более высоких частот отраженные радиосигналы с длительность зондирующего импульса сильно расширяются, как бы дополняясь «хвостами», или «тянучками». Чаще всего эти «хвосты» возникают из-за наличия проводимости в среде. Для водоема это служит признаком высокой

солености. Сигналы на озере Чебаркуль тоже имели «хвосты», но вода в озере пресная и используется для водоснабжения города!

Причина их появления оказалась в другом: уширение отраженных импульсов давал ил-сапропель толщиной в несколько метров, плотность которого плавно увеличивалась по мере приближения к поверхности дна. Обычно радиосигнал отражается от границы между слоями, а здесь он отражается от всей толщи ила, которую можно рассматривать как очень широкую границу между водой и твердым дном. Это мы выяснили уже дома, с помощью численного моделирования.

В результате построения «три дэ» получили общее представление о подводных кратерах метеорита. Их оказалось несколько, что говорит о его разрушении. Основная яма расположена в 30 метрах от полыньи под азимутом 290 градусов, который совпадает со свидетельствами очевидцев, наблюдавших траекторию падения. Все дно в области наших георадарных съемок буквально вспахано этим Чебаркульским осколком Челябинского метеорита.

Георадарное обследование предполагаемого места падения фрагмента метеорита Челябинск в озеро Чебаркуль

В.В. Копейкин*, В.Д. Кузнецов*, П.А. Морозов*, А.В. Попов*

А.И. Бекрут**, С.В. Меркулов**, В.А. Алексеев***

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)

ООО ВНИИСМИ, * Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)

142190 Москва, г. Троицк, Калужское ш. 4, ИЗМИРАН, e-mail: popov@izmiran.ru

Аннотация. Проведено георадарное зондирование дна озера Чебаркуль в районе падения крупного фрагмента метеорита «Челябинск». Линейные профили и трехмерная реконструкция выявляют аномальное понижение рельефа дна и нарушение структуры ледового покрова, указывающие вероятное место залегания осколков метеорита



Рис. 1. Полынья, образовавшаяся при падении фрагмента метеорита «Челябинск» в озеро Чебаркуль.

По свидетельству очевидцев один из крупных фрагментов метеорита «Челябинск» 15 февраля 2013 г. упал в западной части озера Чебаркуль, оставив во льду овальную полынью размером 6х8 метров.

Попытки найти метеорит на дне озера в непосредственной близости от полыни оказались безрезультатными, хотя ученые и местные жители извлекали из проруби с помощью магнита небольшие осколки со значительным содержанием железа. Глубина озера в районе падения метеорита порядка 10 метров, работу водолазов затрудняло наличие толстого слоя рыхлого ила, достигающего по их оценкам двух и более метров. Для уточнения вероятного местонахождения Чебаркульского фрагмента, было проведено дистанционное зондирование дна озера с помощью георадара «Лоза-Н», разработанного в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) [1] и ООО ВНИИСМИ [2].

Принцип действия георадара основан на излучении в подстилающую среду сверхширокополосных электромагнитных импульсов и регистрации их отражений от границ раздела слоев или локализованных объектов.

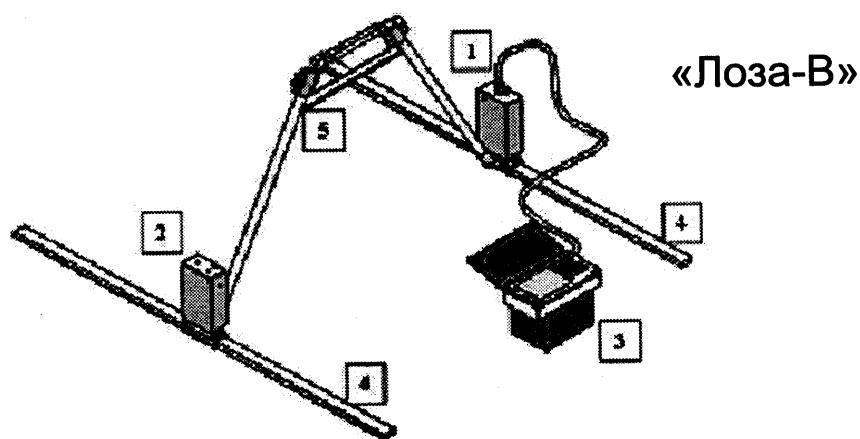


Рис. 2. Конструкция георадара «Лоза-В»:

- 1) приемник, 2) импульсный передатчик,
3) блок регистрации и дисплей, 4) передающая и приемная антенны длиной 0.5 – 1.5 метра, 5) рама.

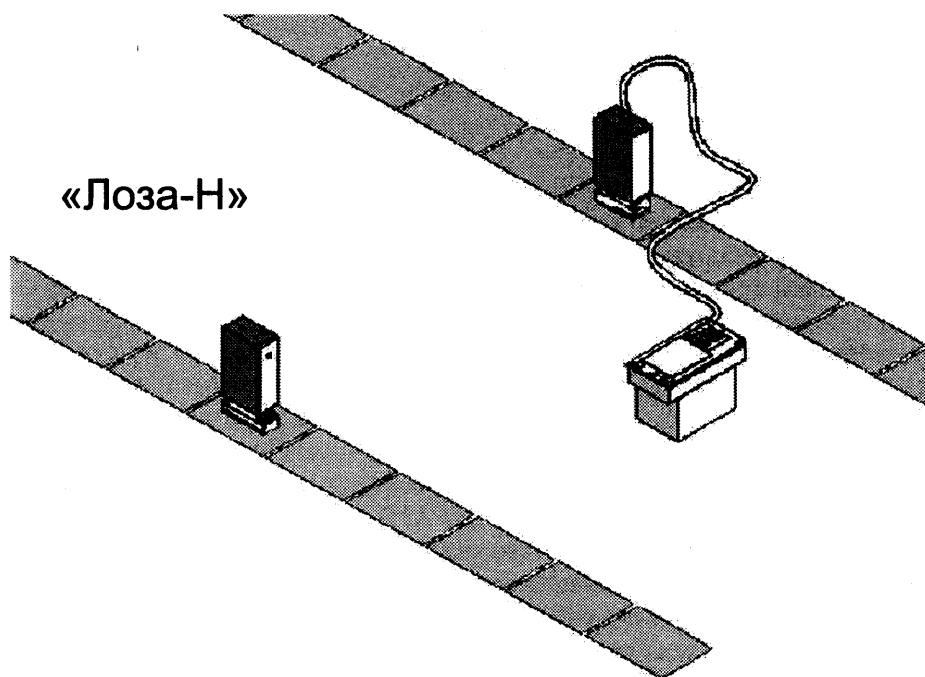


Рис. 3. Конструкция георадара «Лоза-Н»: длина антенн увеличена до 3-6 метров.

Отличительной особенностью приборов серии «Лоза», по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами, является большой энергетический потенциал, позволяющий работать в средах с высокой проводимостью, например в суглинке или влажной глине. Зондирующий импульс генерируется высоковольтным газовым разрядником с пиковым напряжением 5-10 кВ и излучается резистивно-нагруженной дипольной антенной длиной от 0.5 до 6 метров. Аналогичная антенна используется в приемном устройстве. В зависимости от модели прибора и параметров среды глубина зондирования составляет от единиц до сотни метров.

За три дня полевых работ (12-14 марта 2013 г.) участники экспедиции ИЗМИРАН-ВНИИСМИ сняли 36 георадарных профилей длиной по 100-120 м в районе падения метеорита. Сетка покрывает полынью и участок 100x100 м к западу от нее.

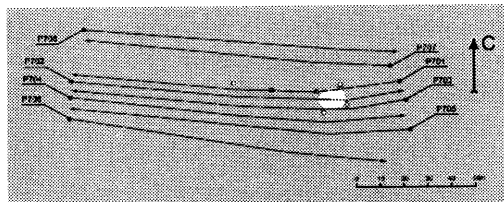
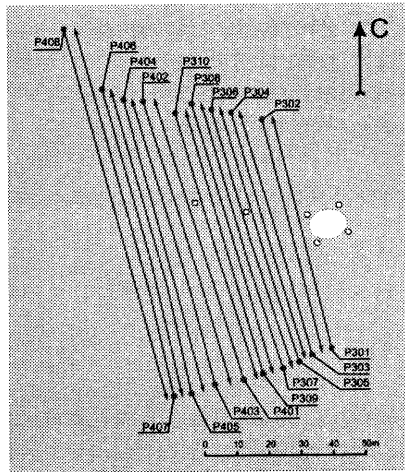


Рис. 4. Трассы георадарного зондирования района падения метеорита в озеро Чебаркуль.



Зондирование, производимое с поверхности льда, позволило восстановить детальную картину рельефа дна и указать наиболее вероятное место залегания метеорита или его осколков. Кроме того, в районе падения были собраны пробы воды, льда и мелкодисперсная фракция осколков для дальнейшего физико-химического анализа, подтвердившего свидетельства о метеоритном происхождении Чебаркульской полыньи. На фотографиях показаны распыленные частицы метеорита, собранные с верхней и нижней поверхности льда вокруг ледяной воронки - Рис. 5(а), а также более крупные осколки, извлеченные со дна озера с помощью магнита - Рис. 5(б).

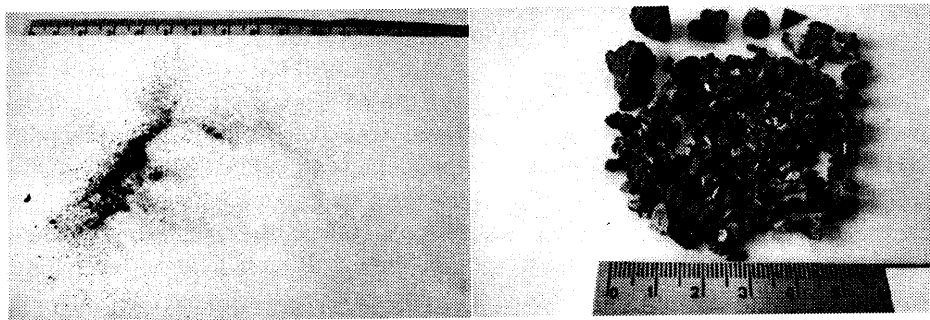


Рис. 5. (а) микронная фракция осколков метеорита, собранных со льда озера Чебаркуль; (б) более крупные осколки, извлеченные со дна озера в районе полыньи.

Измерение магнитного момента миллиметровых осколков (Рис. 6) дает значения, согласующиеся с известными характеристиками других фрагментов метеорита «Челябинск».

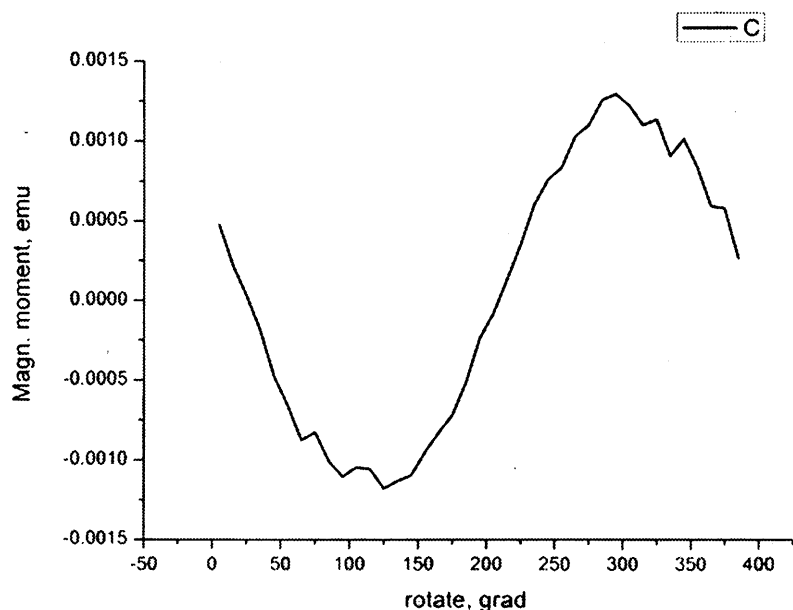


Рис. 6. Магнитный момент трехмиллиметрового осколка Чебаркульского метеорита.

Ниже приведен пример представления первичных данных георадарного зондирования в программе «Крот-1301», разработанной ВНИИСМИ. На правой панели представлена волновая форма импульса, зарегистрированная приемником георадара в избранной точке профиля (A-scan по терминологии [3]). При прохождении трассы они складываются в вертикальные разрезы (B-scan), изображенные в двух левых панелях рисунка 7. По горизонтали отложено расстояние в метрах, по вертикали — время прихода отраженного импульса в наносекундах (правая шкала) и расчетная глубина отражающей границы (левая шкала).

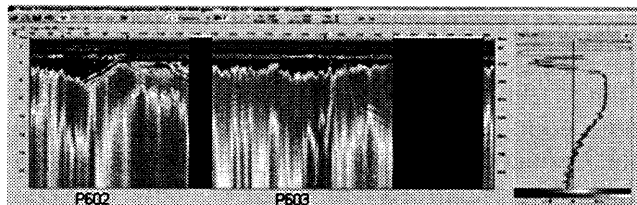


Рис. 7.
Представление данных георадарного зондирования

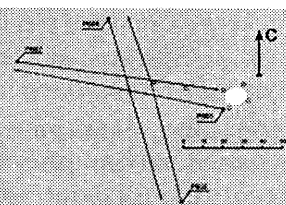


Рис. 8. Профили
Р601-604 в программе
«Крот-1301»

Полосы в верхней части картины соответствуют прямому сигналу, распространяющемуся от передающей к приемной антенне с различными скоростями - по воздуху, в толще снега и в воде под слоем льда. Лежащие ниже широкие полосы соответствуют затянутым однополярным импульсам, отраженным на плавном переходе от ила к породам твердого дна. Такое поведение волновой формы принятого сигнала, характерное для низкочастотного георадара «Лоза-Н», обычно объясняется влиянием проводимости подповерхностной среды. Однако, как показало численное моделирование, в данном случае основное влияние оказывает не проводимость, а плавное изменение диэлектрической проницаемости, связанное с повышением содержания твердой фракции ила с глубиной.

Для интерпретации наблюдаемого характера отраженного сигнала было проведено моделирование вертикального распространения импульсного сигнала в глубь слоисто-неоднородной подповерхностной среды численным решением одномерного волнового уравнения [4]. Наилучшее соответствие достигается в модели среды, состоящей из однородного слоя воды (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_0 = 81$) и следующего за ним плавного перехода к твердому грунту с диэлектрической проницаемостью порядка $\epsilon_1 = 10 \div 20$ - левая панель Рис. 9. Был также учтен плавный рост удельной проводимости среды от $\sigma_0 = 0$ до величин порядка $\sigma_1 = 0,001$ С/м. Характерная длительность зондирующего импульса порядка 25 нс, что близко к реальной длительности импульса, излучаемого георадаром.

Пространственно-временная картина распространения импульса в подповерхностной среде представлена на основной панели рисунка. Видно постепенное увеличение скорости с глубиной и возникновение слабого обратного сигнала за счет частичных отражений

на вертикальных градиентах диэлектрической проницаемости. Этот отраженный сигнал возвращается в приемную антенну, расположенную на поверхности, и регистрируется чувствительным приемником георадара. Электрическое поле на поверхности $z = 0$ изображено в верхней панели рисунка. Чтобы сделать слабый отраженный сигнал заметным на фоне мощного первичного импульса введено небольшое экспоненциальное усиление $\exp(\alpha t)$.

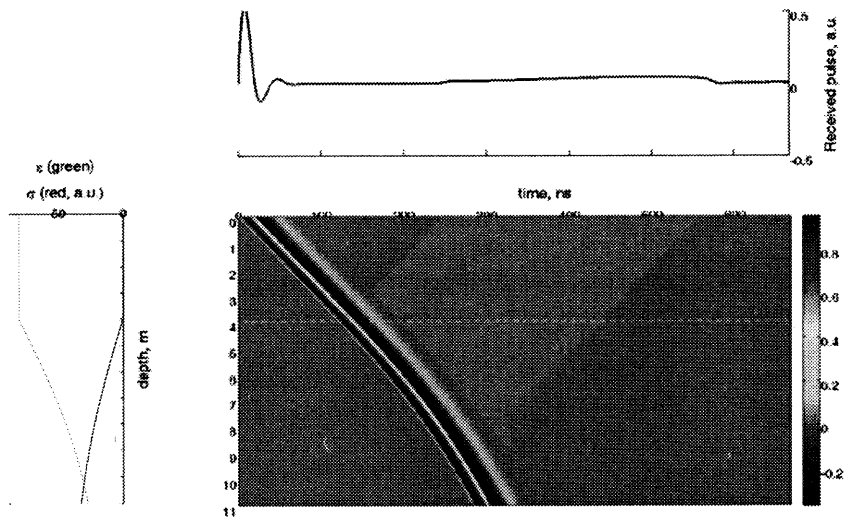


Рис. 9. Одномерное распространение импульса в неоднородной среде:

- а) - зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости от глубины (левая панель); б) - пространственно-временная картина (основная панель);
- в) - поле на поверхности с экспоненциальным аппаратным усилением (верхняя панель).

Его волновая форма, показанная на Рис. 10 в увеличенном масштабе на фоне первичного зондирующего импульса, имеет характер близкий к реально наблюдаемым волновым формам низкочастотного зондирования (без учета прямого распространения от передатчика к приемнику). При обработке первичных данных программным

обеспечением пакета «Крот» характерные точки максимального изменения амплитуды отраженного сигнала интерпретируются как границы неоднородного переходного слоя между чистой водой и твердым грунтом.

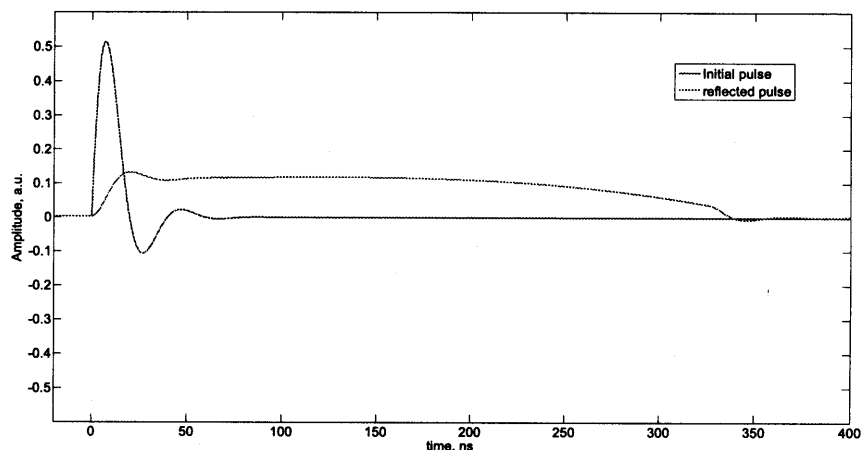


Рис. 10. Сигнал, отраженный от градиента диэлектрической проницаемости, (сплошная линия) на фоне первичного зондирующего импульса.

При анализе георадарных разрезов, представленных на Рис. 7, обращает на себя внимание утолщение и нарушение структуры ледяного покрова, а также резкое понижение рельефа дна на профиле Р602 в районе пересечения с профилем Р603 - Рис. 8. Мы интерпретируем эту аномалию как результат удара метеорита о дно озера. Подтверждением этой гипотезы служат наблюдательные факты. Траектория движения метеорита по наклонной траектории в северо-западном направлении с азимутом 280-290 градусов и малое количество выброшенного вверх льда наводят на мысль, что основная его масса была увлечена под воду к западу от полыньи и затем всплыла, нарушив структуру ледяного покрова над воронкой.

Исходя из этих соображений был проведен детальный анализ георадарных разрезов, представленных на Рис. 4. Стандартная обработка радарограмм с помощью частотных фильтров программного пакета «Крот» позволяет выделить характерные точки профиля (максимумы производной амплитуды отраженного сигнала) и свя-

зять их в радиообраз отражающих границ. Пример такой обработки, наглядно выявляющей рельеф дна и нарушение структуры ледового покрова, приведен на Рис. 11.

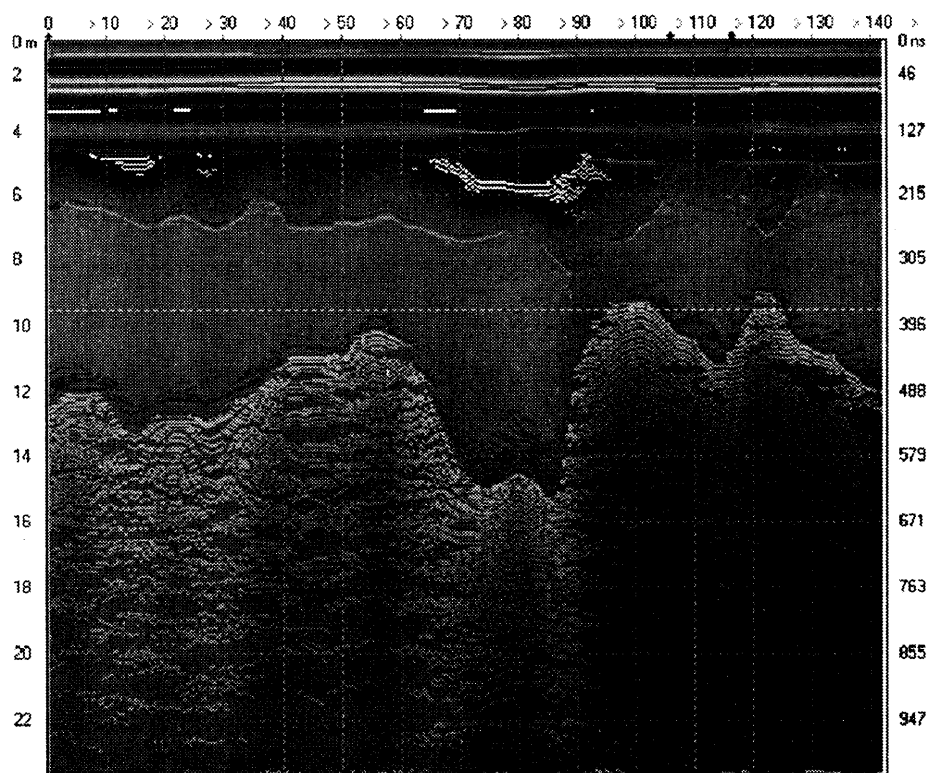


Рис. 11. Линейный профиль Р602, обработанный программой «Крот»

Границы переходного слоя между чистой водой и твердым дном показаны оранжевой линией. Полынья, возникшая при падении метеорита на лед (уже замерзшая в период проведения измерений), отмечена черными маркерами на горизонтальной шкале в районе 110 м. Резкое понижение рельефа дна, которое мы интерпретируем как воронку, образовавшуюся при ударе метеорита о дно озера, наблюдается в 30 метрах к западу на отметке 80 м. Желтая полоса в верхней части профиля по-видимому связана с утолщением ледового покрова за счет массы льда, увлеченного метеоритом и затем

всплывшего над воронкой. Аналогичная аномалия наблюдается на соседних профилях, что позволяет восстановить трехмерную картину образовавшейся воронки – Рис. 12.

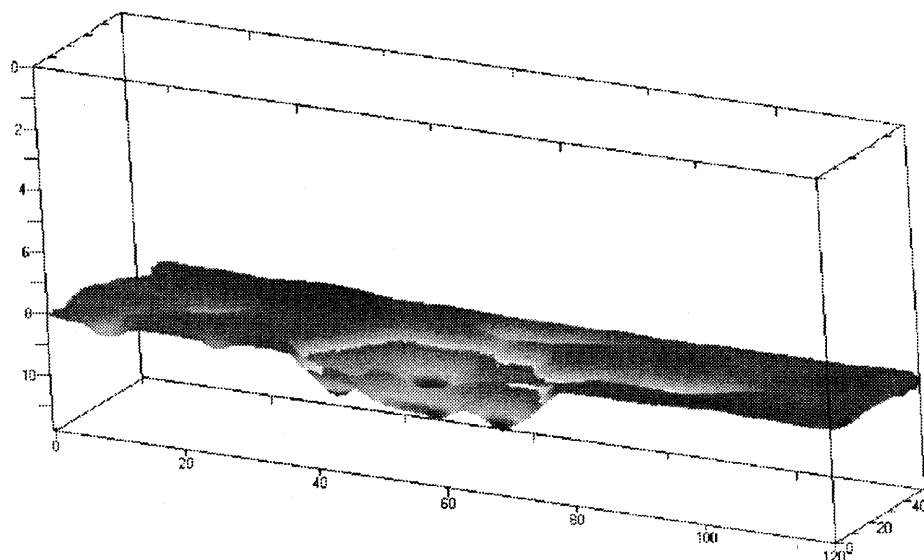


Рис. 12. 3D-реконструкция рельефа дна в районе падения метеорита.

Положение воронки относительно полыньи согласуется со всей совокупностью наблюдательных данных о траектории движения метеорита «Челябинск», что позволяет нам рекомендовать проведение дальнейших поисков Чебаркульского фрагмента на дне озера в указанном выше районе. Учитывая имеющиеся данные о значительном содержании железа, дополнительную уверенность может дать сопоставление наших результатов с магнитными измерениями. В заключение приведем результат более детальной реконструкции рельефа твердого дна, дающий основание предполагать, что в результате удара об лед метеорит мог расколоться на несколько более мелких кусков - Рис. 13.

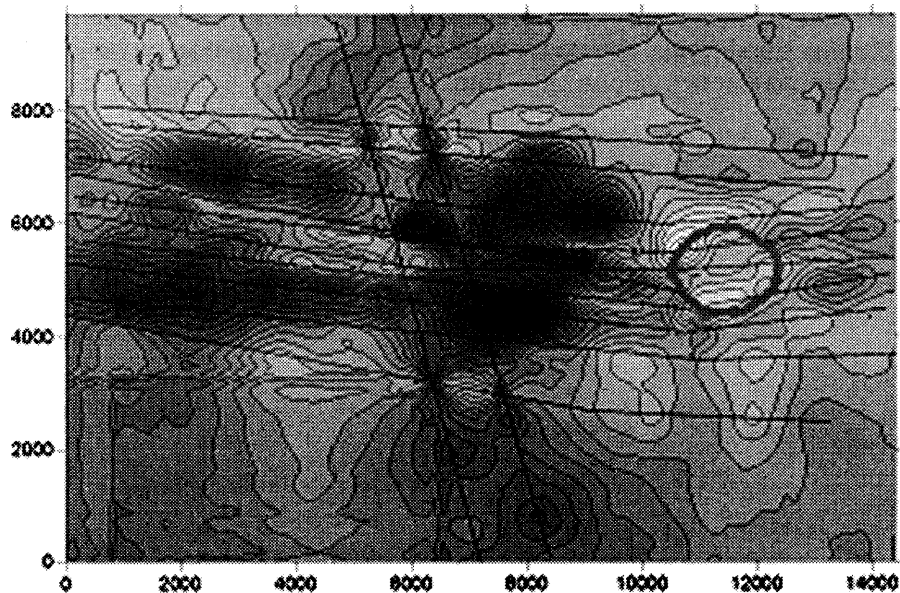


Рис. 13. Детальная картина изобат по данным георадара

Авторы благодарят администрацию Чебаркульского городского округа за поддержку и техническое обеспечение полевых работ.

Литература

1. V.V. Kopeikin, D.E. Edemsky, V.A. Garbatsevich, A.V. Popov, A.E. Reznikov, A.Yu. Schekotov. Enhanced power ground penetrating radars. 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. Conference Proceedings, pp. 152-154, Sendai, Japan, 1996.
2. <http://www.geo-radar.ru/>.
3. D.J. Daniels. Ground Penetrating Radar. IEE, London, 2004, 731 p.
4. V.A. Vinogradov, V.V. Kopeikin, A.V. Popov. An approximate solution of 1D inverse problem. 10th Internat. Conf. on Ground Penetrating Radar, pp. 95-98, Delft, The Netherlands, 2004.