

ГЕОРАДАРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО МЕСТА ПАДЕНИЯ ФРАГМЕНТА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК В ОЗЕРО ЧЕБАРКУЛЬ

© 2013 г. В. В. Копейкин*, В. Д. Кузнецов*, П. А. Морозов*, А. В. Попов*, А. И. Беркут**,
С. В. Меркулов**, В. А. Алексеев***

* Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН)
142190 Москва, Троицк, Калужское ш., 4
e-mail: popov@izmiran.ru

** ООО “Компания ВНИИСМИ” 129090 Москва, Олимпийский проспект, д. 16, стр. 1

*** Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)
142190 Москва, Троицк, ул. Пушковых, 9

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

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.

Ключевые слова: метеорит Челябинск, озеро Чебаркуль, георадар.

DOI: 10.7868/S001675251307011X

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 6 × 8 метров – рис. 1.

Попытки найти метеорит на дне озера в непосредственной близости от полыньи 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”, разработанного в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) [1] и ООО “Компания 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.

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 – рис. 2. В зависимости от модели прибора и параметров среды глубина зондирования составляет от единиц до сотни метров. Исходя из условий георадарной съемки (глубина озера, толщина льда и снегового покрова) была выбрана модель “Лоза-Н” – рис. 3, обеспечивающая достаточную глубину зондирования и отсутствие мешающих резонансных эффектов.

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 100 × 100 м к западу от нее – рис. 4.

Зондирование, производимое с поверхности льда, позволило восстановить детальную картину



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

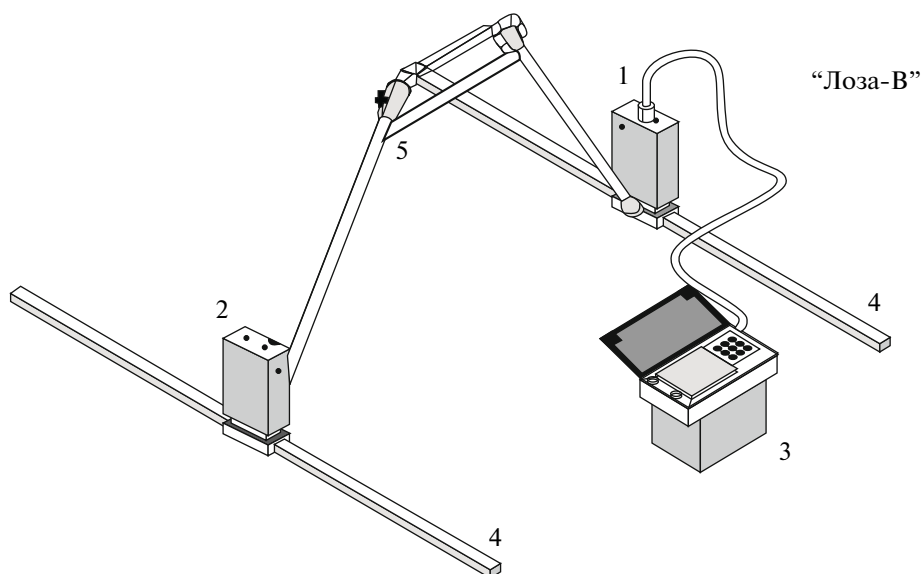


Рис. 2. Конструкция георадара “Лоза-В”: 1) приемник, 2) импульсный передатчик, 3) блок регистрации и дисплей, 4) передающая и приемная антенны длиной 0.5–1.5 метра, 5) рама.

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 метео-

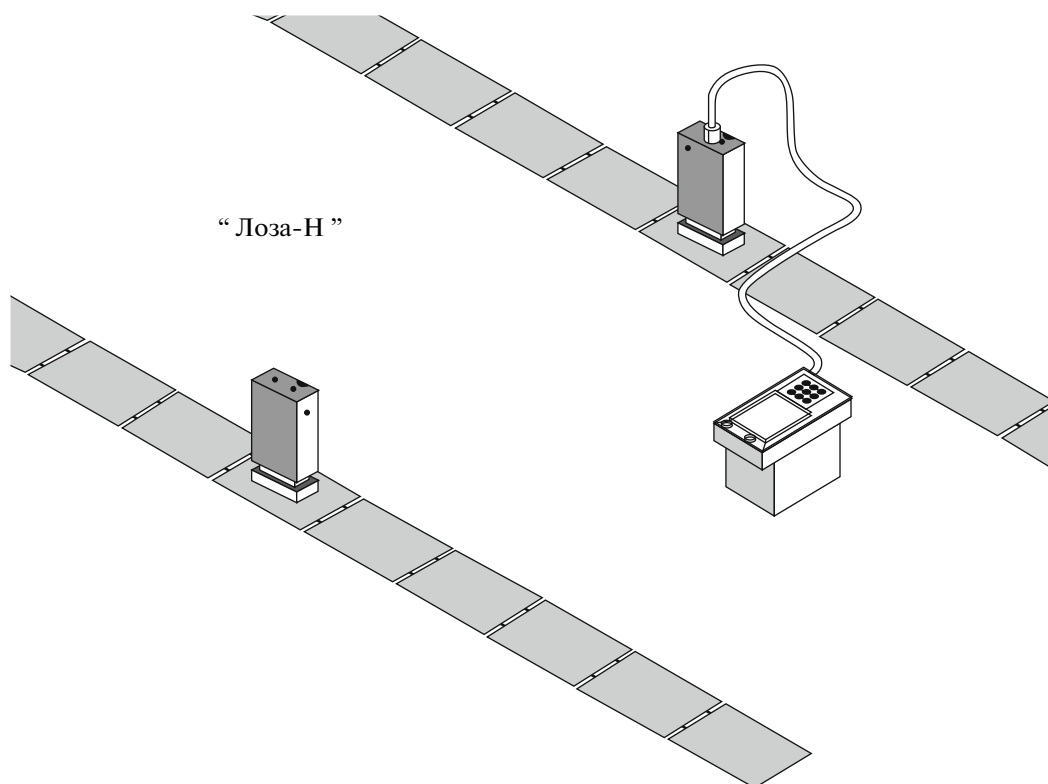


Рис. 3. Конструкция георадара “Лоза-Н”: длина антенн увеличена до 3–6 метров.

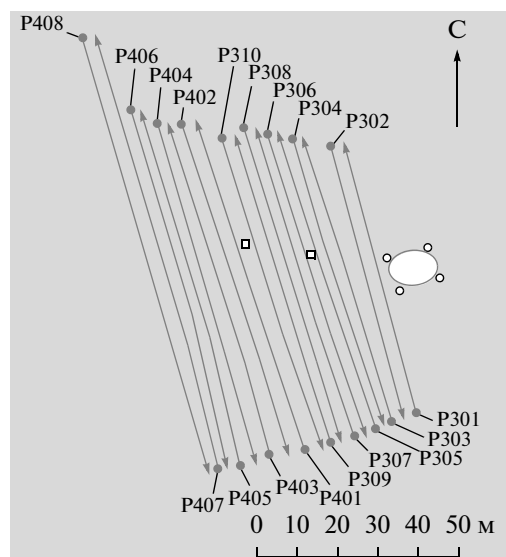
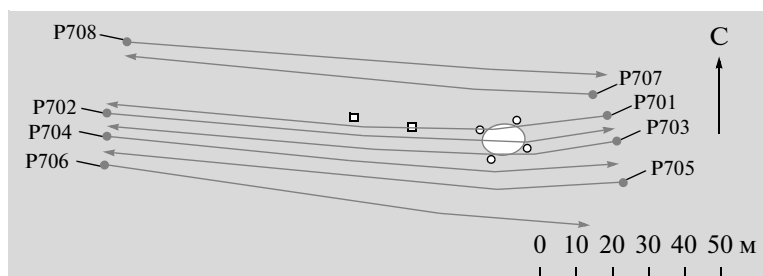


Рис. 4. Трассы георадарного зондирования района падения метеорита в озеро Чебаркуль.

рита, собранные с верхней и нижней поверхности льда вокруг ледяной воронки — рис. 5а, а также более крупные осколки, извлеченные со дна озера с помощью магнита — рис. 5б.

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

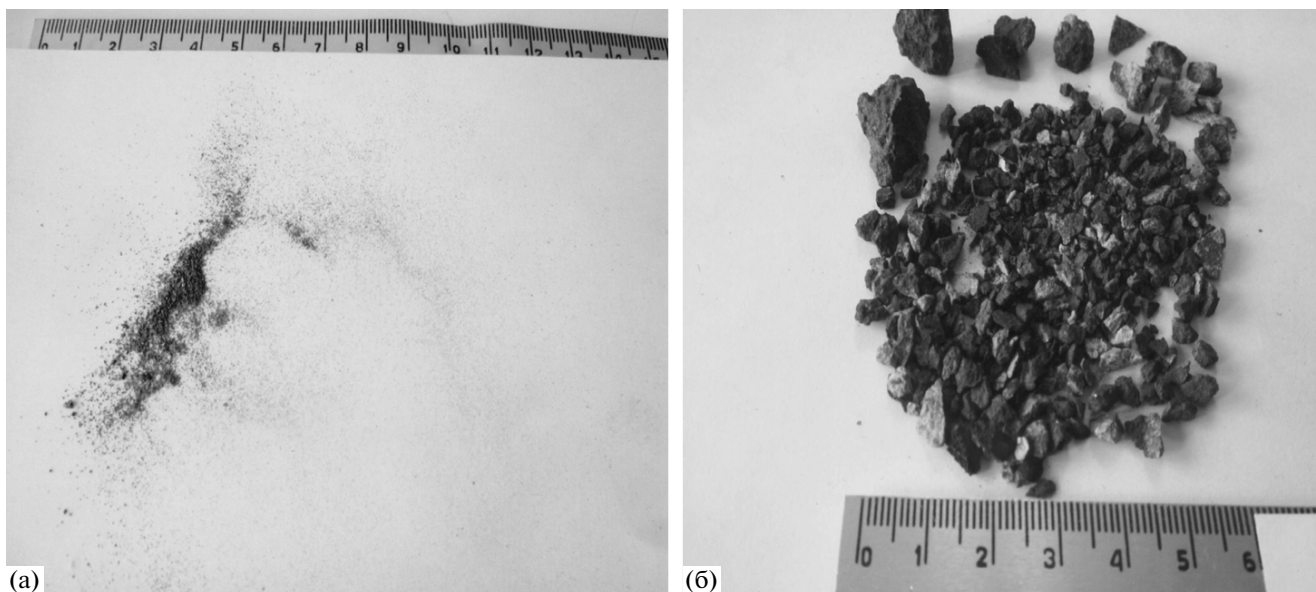


Рис. 5. (а) микронная фракция осколков метеорита, собранных со льда озера Чебаркуль; (б) более крупные осколки, извлеченные со дна озера в районе полыньи.

На рисунке 7 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 (А-scan по терминологии [3]). При прохождении трассы они складываются в вертикальные разрезы (В-scan), изображенные в двух левых панелях рисунка.

По горизонтали отложено расстояние в метрах, по вертикали — время прихода отраженного импульса в наносекундах (правая шкала) и расчетная глубина отражающей границы (левая шкала). 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 $\epsilon_1 = 10-20$ — левая панель рис. 8. Был также учтен плавный

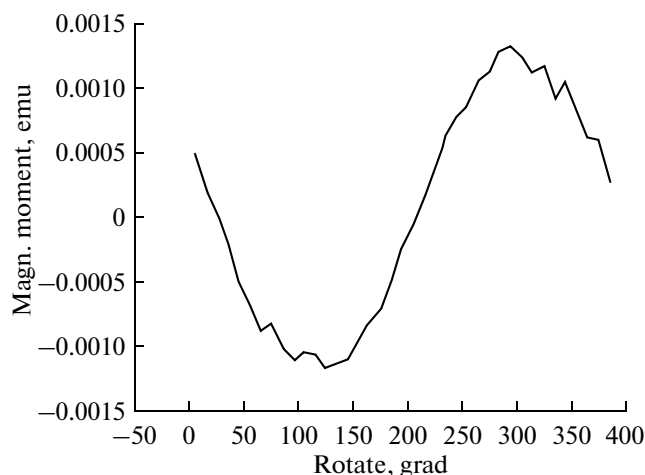


Рис. 6. Магнитный момент трехмиллиметрового осколка Челябинского метеорита.

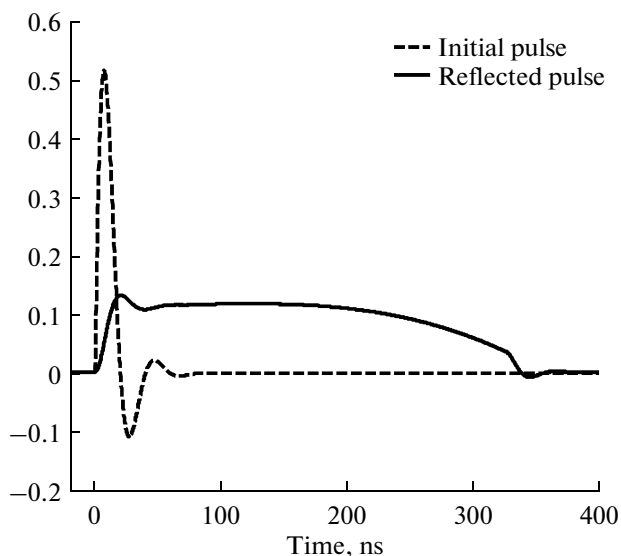


Рис. 9. Сигнал, отраженный от градиента диэлектрической проницаемости, (сплошная линия) на фоне первичного зондирующего импульса.

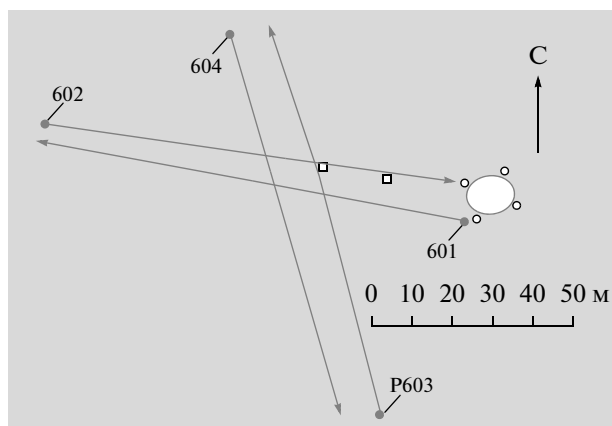


Рис. 10. Георадарные профили P601–604.

рост удельной проводимости среды от $\sigma_0 = 0$ до величин порядка $\sigma_1 = 0.001$ См/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 реги-

стрируется 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 $\exp(\alpha t)$. Его волновая форма, показанная на рис. 9 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.

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 P602 в районе пересечения с профилем P603 – рис. 10.

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

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

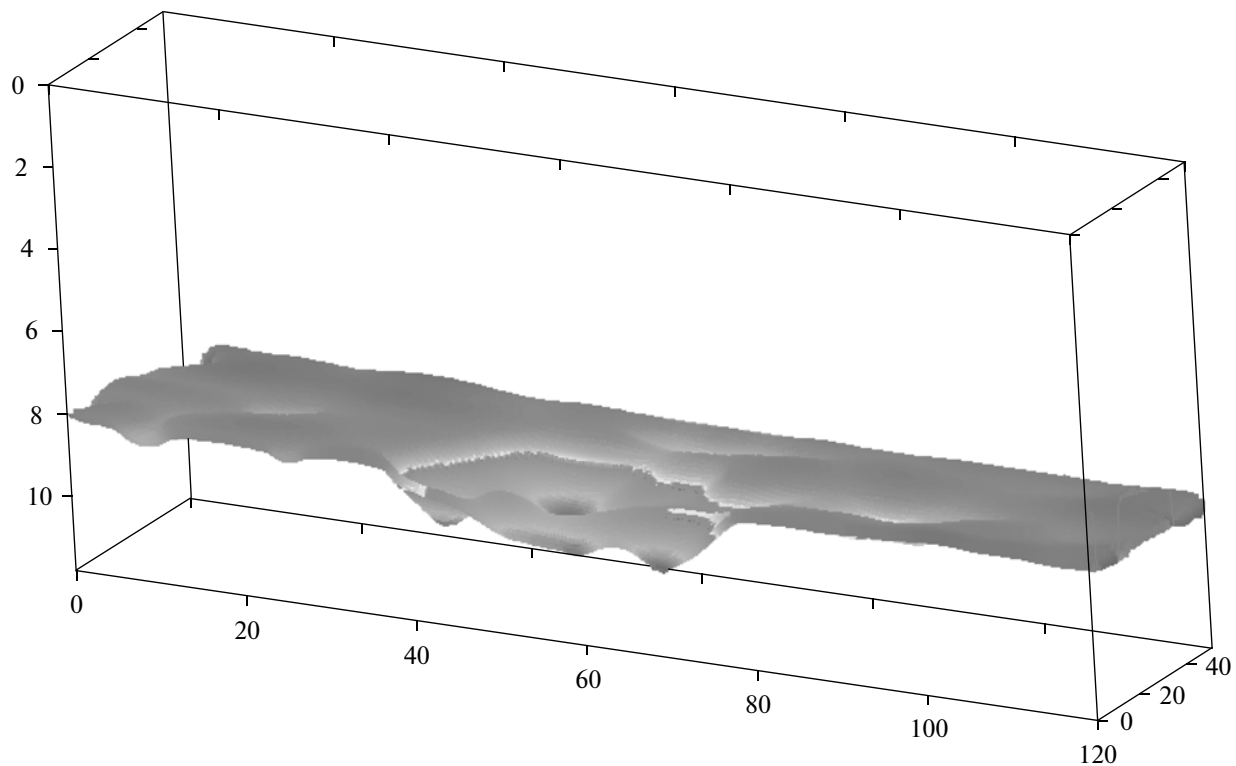


Рис. 12. 3D-реконструкция рельефа дна в районе падения метеорита.

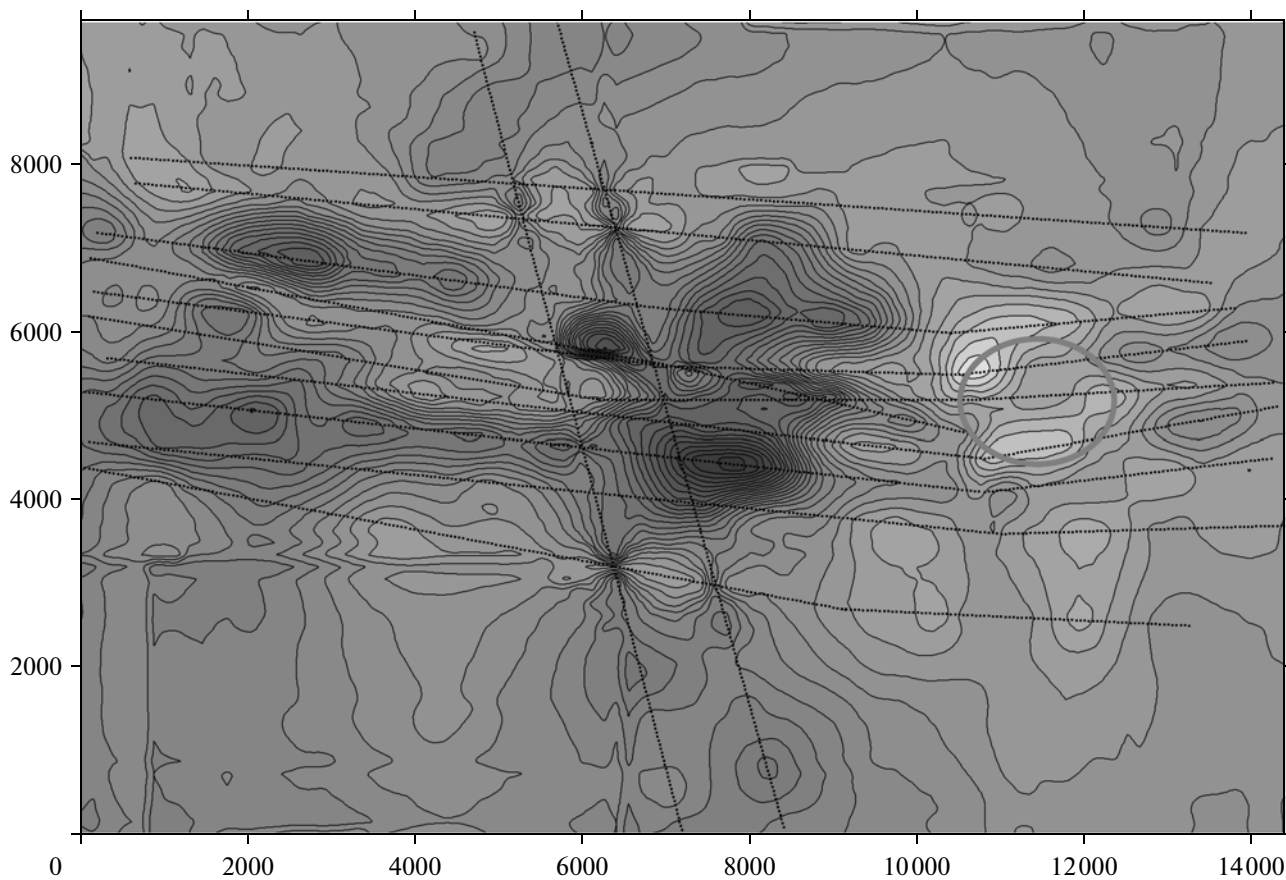


Рис. 13. Детальная картина изобат по данным георадара. Овалом отмечен контур полыньи, по осям — расстояние в направлении З-В и Ю-С (в сантиметрах). Темные пятна соответствуют понижению рельефа дна.

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.

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.

Авторы благодарят А.В. Орлова, Е.В. Королькова и администрацию Чебаркульского городского округа за поддержку и техническое обеспечение полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

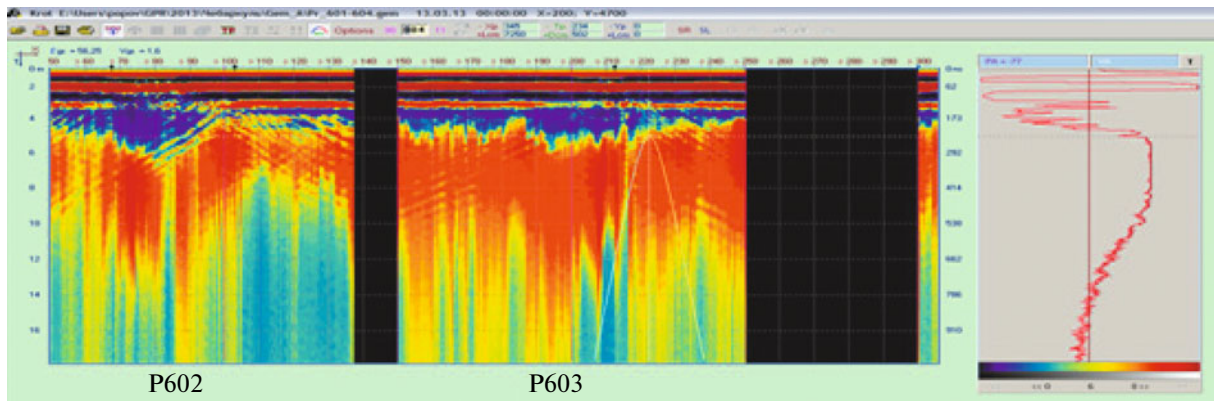


Рис. 7. Представление данных георадарного зондирования в программе “Крот-1301”.

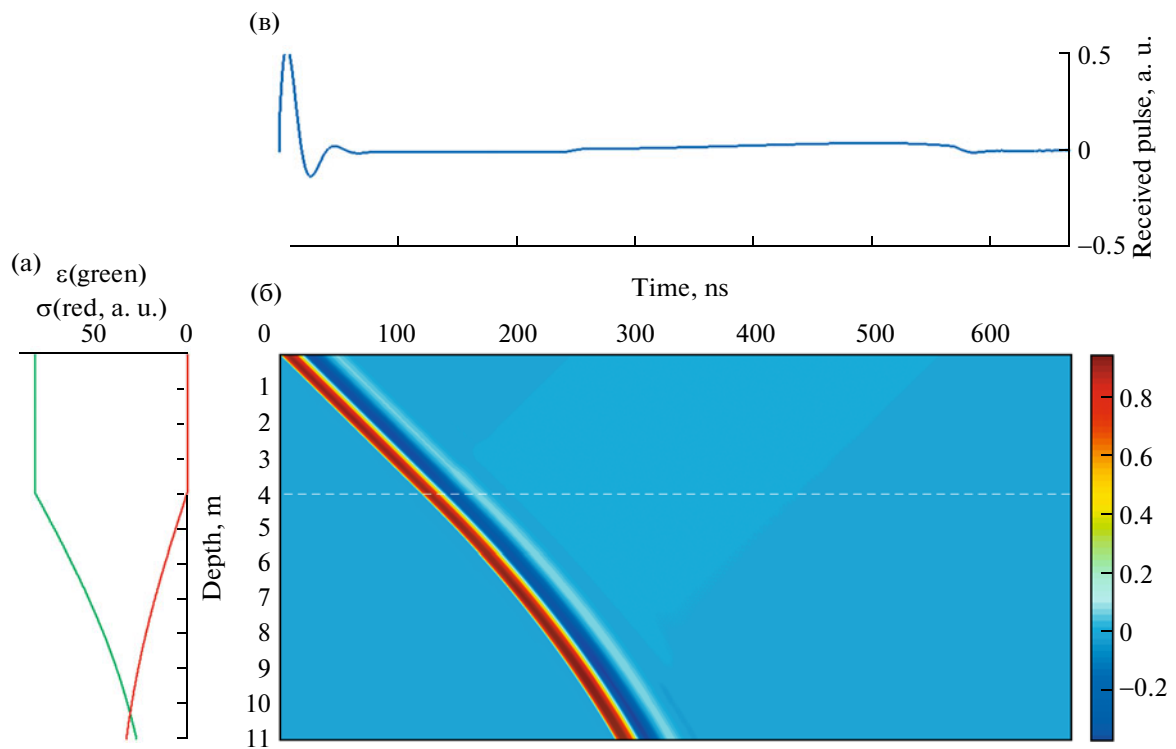


Рис. 8. Одномерное распространение импульса в неоднородной среде: (а) – зависимость диэлектрической проницаемости и проводимости от глубины (левая панель); (б) – пространственно-временная картина (основная панель); (в) – поле на поверхности с экспоненциальным аппаратным усилением (верхняя панель).

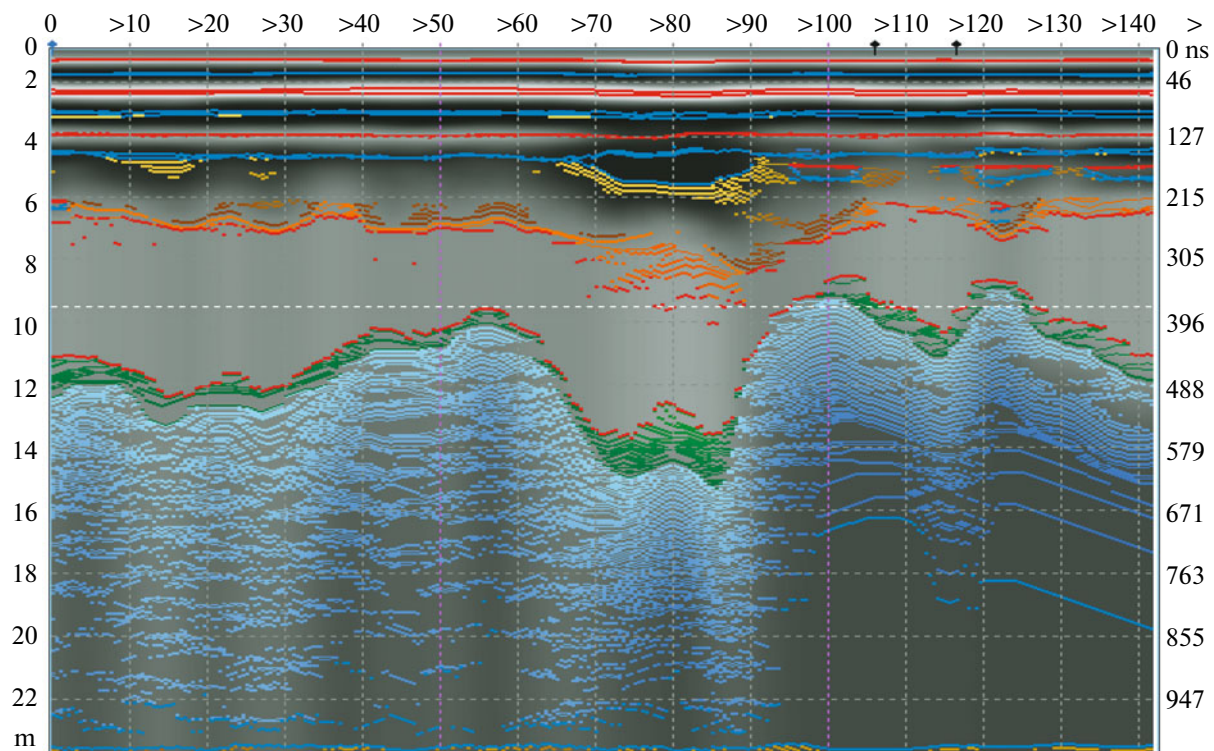


Рис. 11. Линейный профиль Р602, обработанный программой "Крот".