

## Георадарное обследование места падения Чебаркульского фрагмента метеорита «Челябинск».

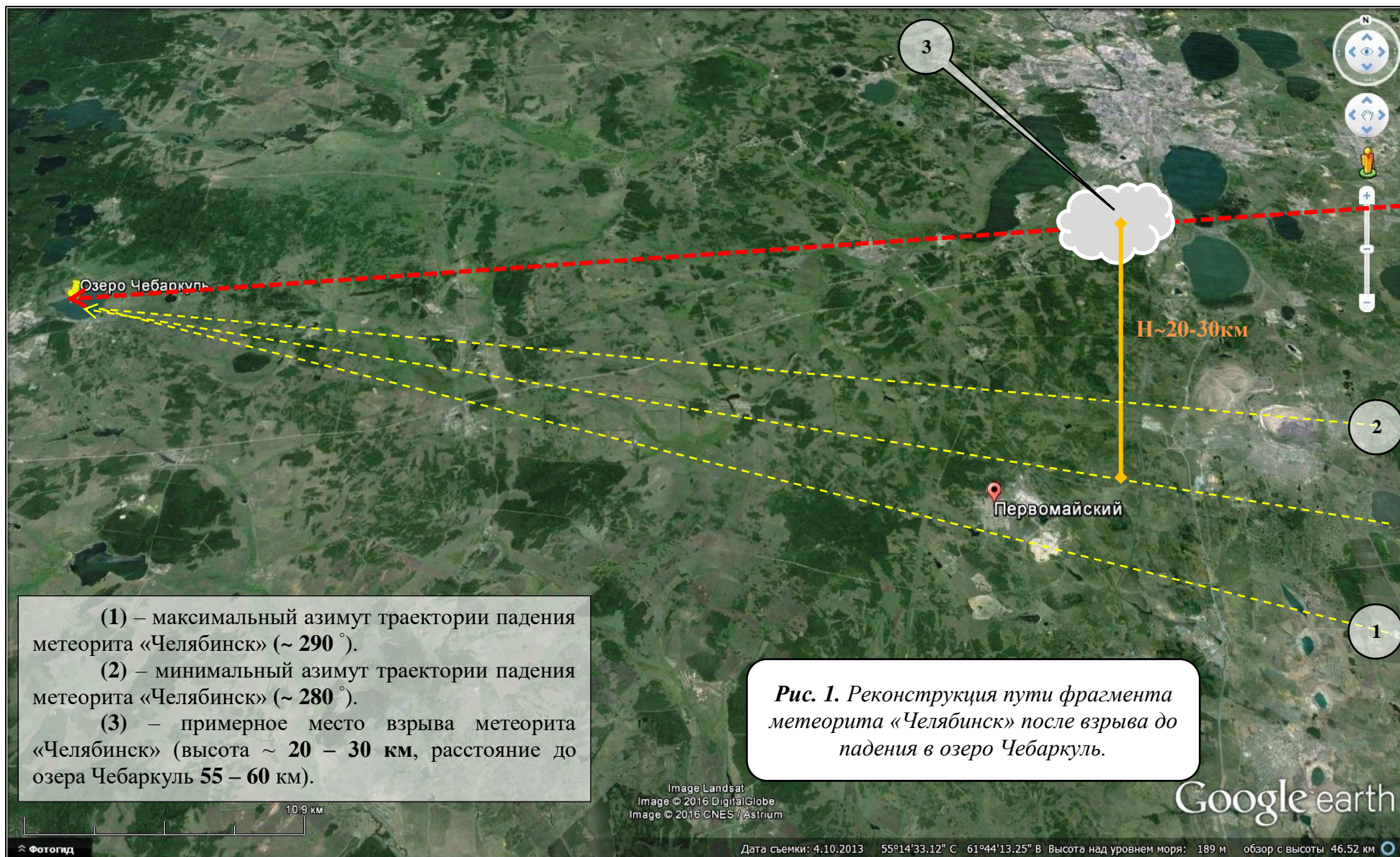
Экспедиция ИЗМИРАН и Компании ВНИИСМИ обследовала место падения фрагмента Челябинского метеорита 12-13 марта 2013 года. Обследования проводились с помощью низкочастотного георадара Лоза-1Н с антеннами 25 МГц (6 м) и передатчиком 10 кВ. Основная



площадка обследования была выбрана в соответствии с реконструкцией пути фрагмента метеорита Челябинск после взрыва до падения в озеро Чебаркуль (рис. 1).

Следы удара фрагмента метеорита о дно озера следовало искать на запад от полыньи (азимут центральной линии площадки ~ 285 °) (рис. 1). В результате площадного георадарного обследования был получен рельеф дна на момент обследования [6].





- (1) – максимальный азимут траектории падения метеорита «Челябинск» (~ 290 °).
- (2) – минимальный азимут траектории падения метеорита «Челябинск» (~ 280 °).
- (3) – примерное место взрыва метеорита «Челябинск» (высота ~ 20 – 30 км, расстояние до озера Чебаркуль 55 – 60 км).

*Рис. 1. Реконструкция пути фрагмента метеорита «Челябинск» после взрыва до падения в озеро Чебаркуль.*

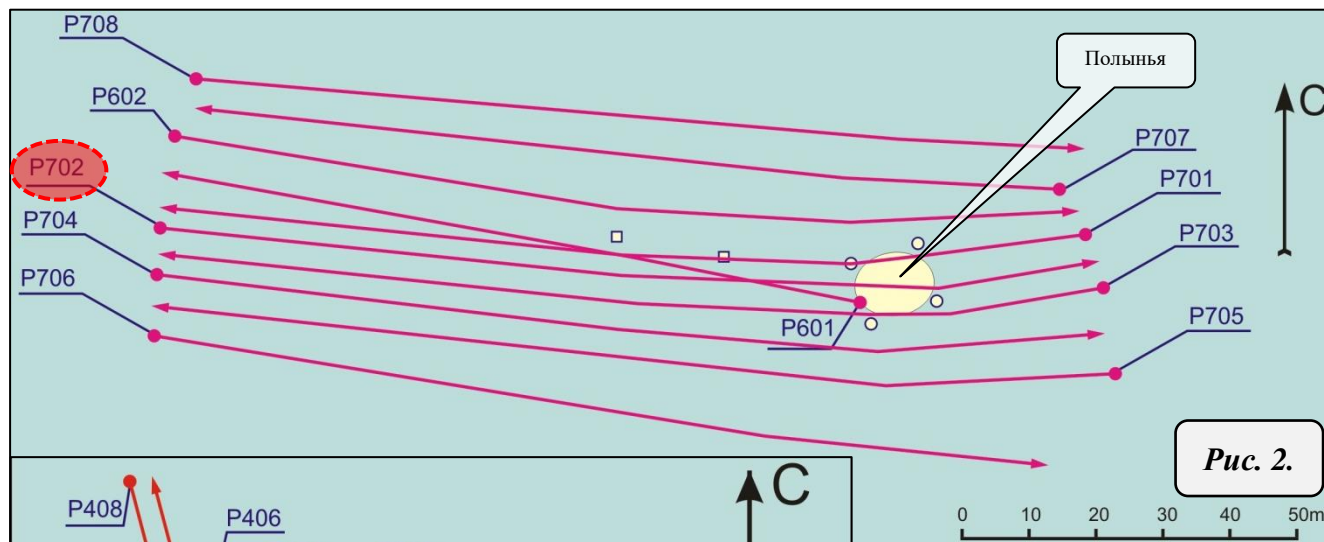


Рис. 2.

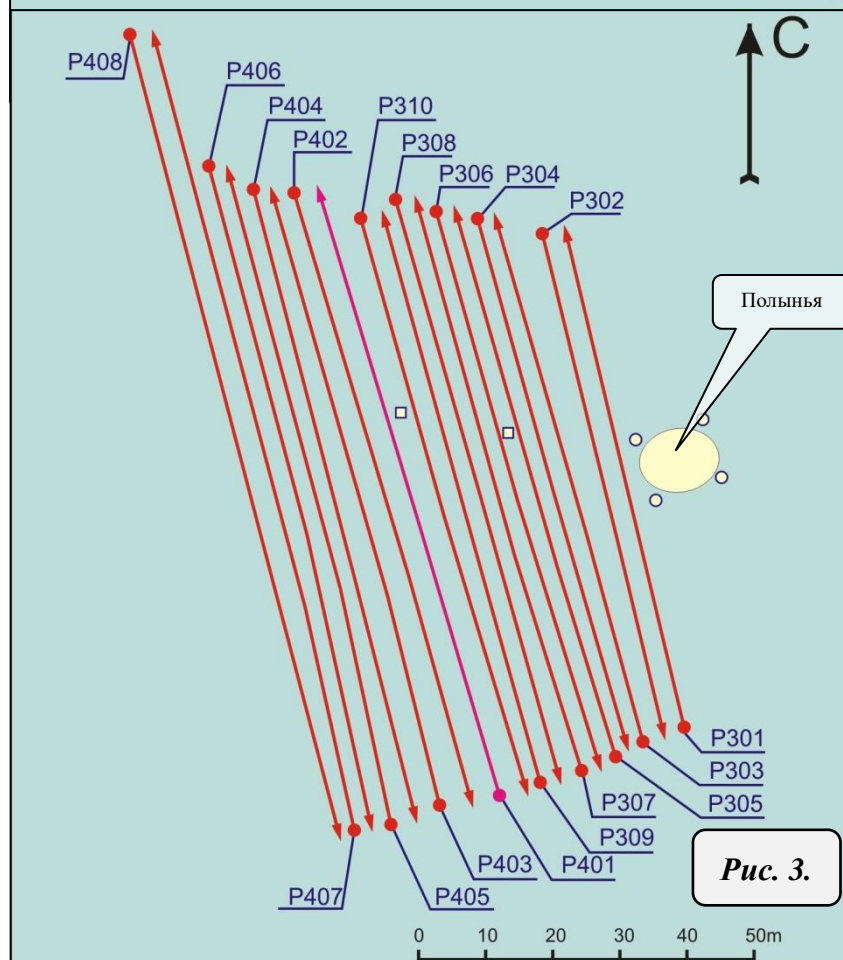
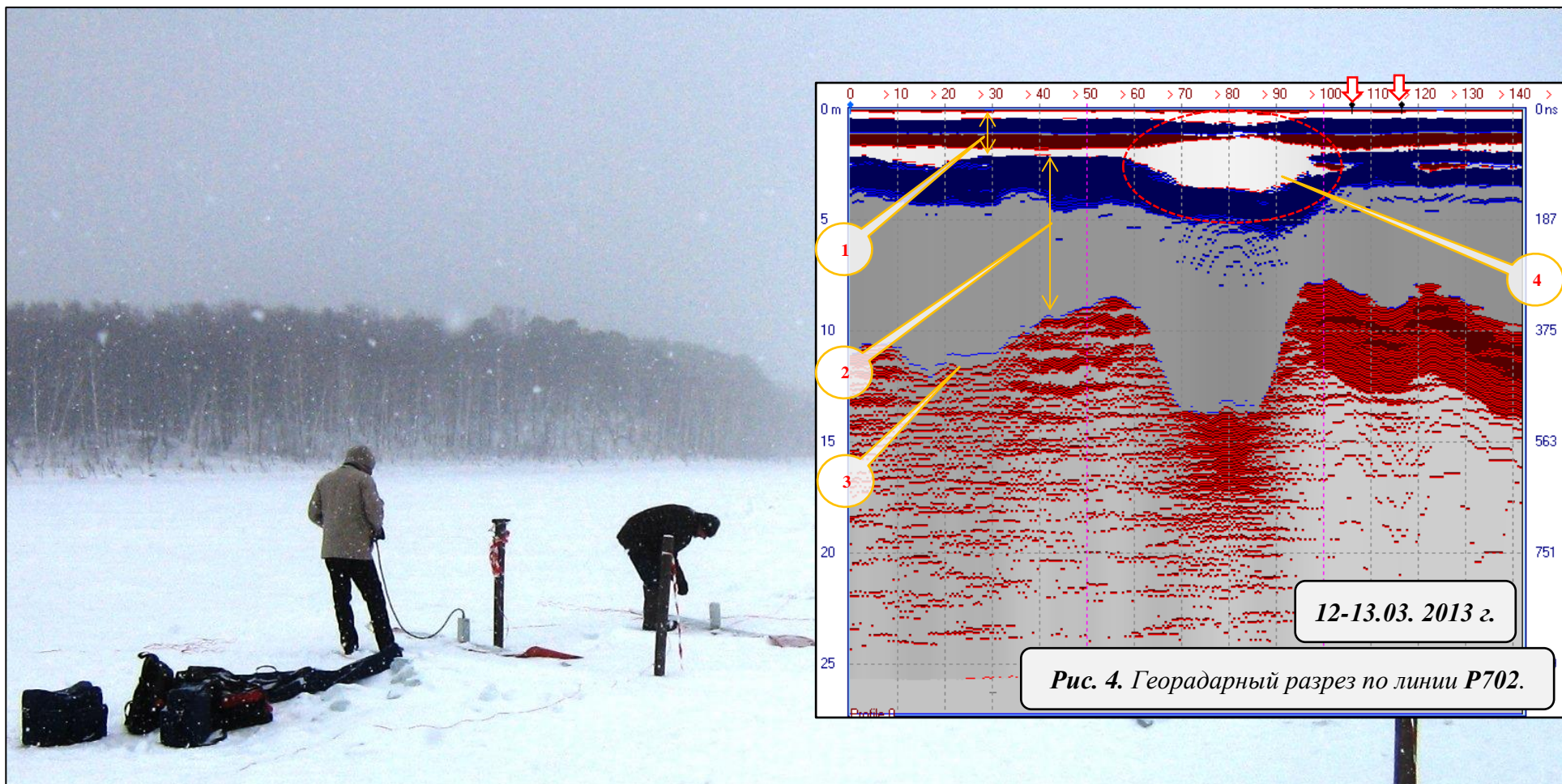


Рис. 3.

Основной объем георадарного обследования 12-13 марта 2013 года был выполнен на участке, примыкающем к полынье с запада. На рисунке 2 приведена схемы продольных (широтных) профилей, на рисунке 3 – схема поперечных профилей. Судя по реконструкции пути метеорита после взрыва, место контакта фрагмента метеорита с дном озера должно было находиться в этом направлении. При глубине озера **10 метров** и с учетом угла падения фрагмента ( $\sim 18 - 24^\circ$ ), место удара метеорита о дно может находиться в **30 – 40 метрах** на запад от проекции полыньи на дно. Размеры площадки обследования (100 x 100 метров) были выбраны так, что бы «с запасом» охватить всю зону возможного контакта метеорита с дном озера.





*Рис. 4. Георадарный разрез по линии P702.*

В процессе выполнения георадарной съемки участники экспедиции обратили внимание на две особенности результатов зондирования: - на поверхности дна озера в направлении на запад от полыньи регистрируются ямы глубиной до нескольких метров, - на нижней границе ледового покрова регистрируется anomальное образование (утолщение) ((4) рис. 4).

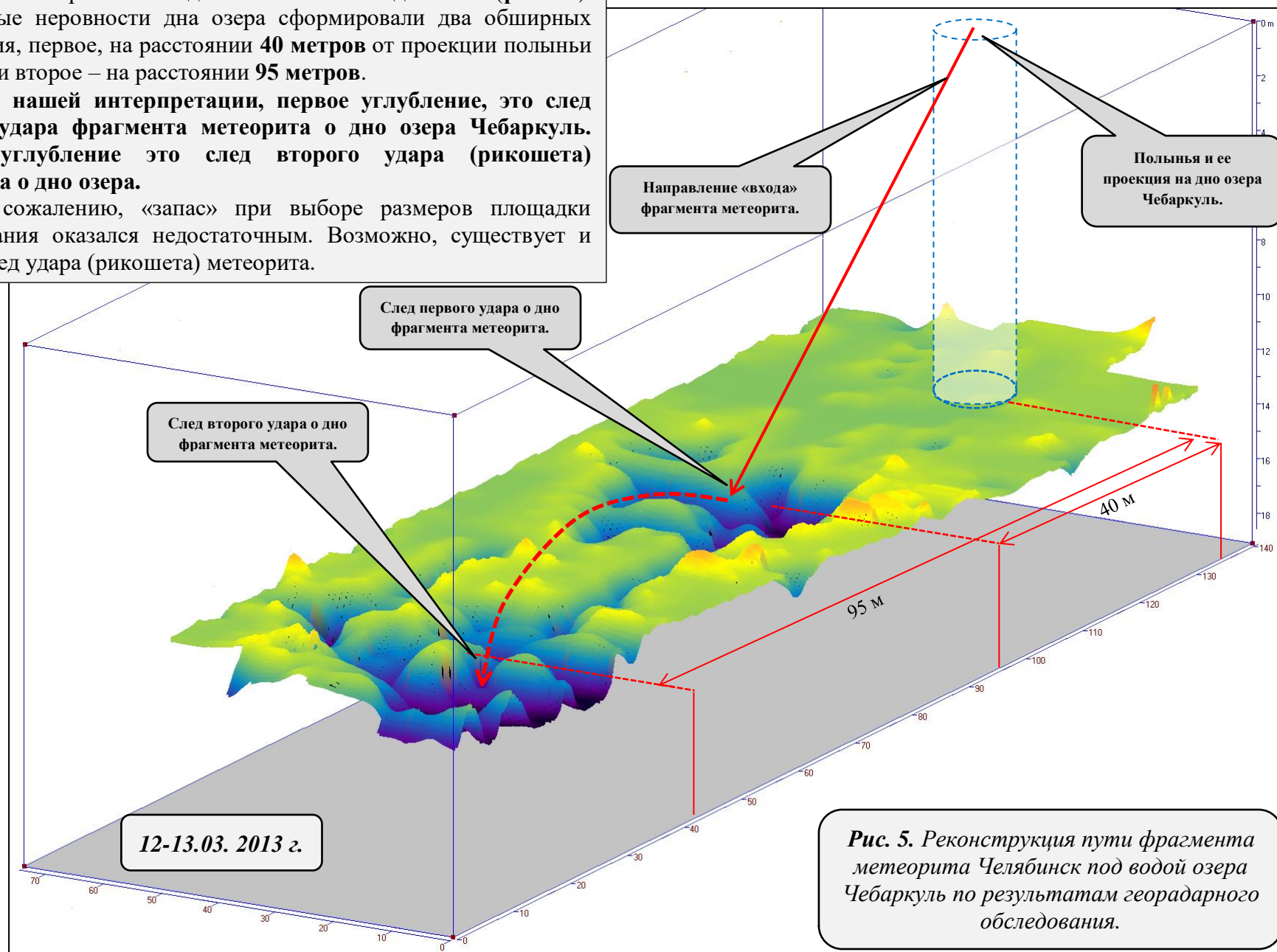
На рисунке 4 изображен георадарный профиль **P702**. Этот профиль проходит по центру площадки обследования с запада через середину полыньи (замерзшей на момент обследования) (рис. 2). Метки на профиле отмечают пересечение краев полыньи. По нашей интерпретации, водная толща озера (2) располагается между поверхностным льдом (1) и дном озера (3). Особый интерес привлекает anomальная структура (4) на нижней поверхности льда. Эта структура представляет собой пологий конус, перевернутый вершиной вниз и примерзший основанием к поверхности льда. Центральная часть конуса (утолщения) расположена в районе отметки **80 метров** (в **20 метрах** от края полыньи). «Высота» перевернутого конуса 1,5 – 2 метра. Поперечные размеры основания конуса **З-В** – 25-30 метров. В направлении **С-Ю** размеры конуса составляют, примерно, 30 метров (по данным профилей P701, P704, P602).

**По нашей интерпретации, содержимое обнаруженного конуса – обломки льда из полыньи, увлеченные метеоритом. После замедления метеорита, обломки льда всплыли к поверхности льда.**

Другая особенность результатов зондирования проявилась, когда все георадарные данные были сведены в 3D блок, и была построена поверхность дна в зоне обследования (рис. 5). Замеченные неровности дна озера сформировали два обширных углубления, первое, на расстоянии **40 метров** от проекции полыньи на запад, и второе – на расстоянии **95 метров**.

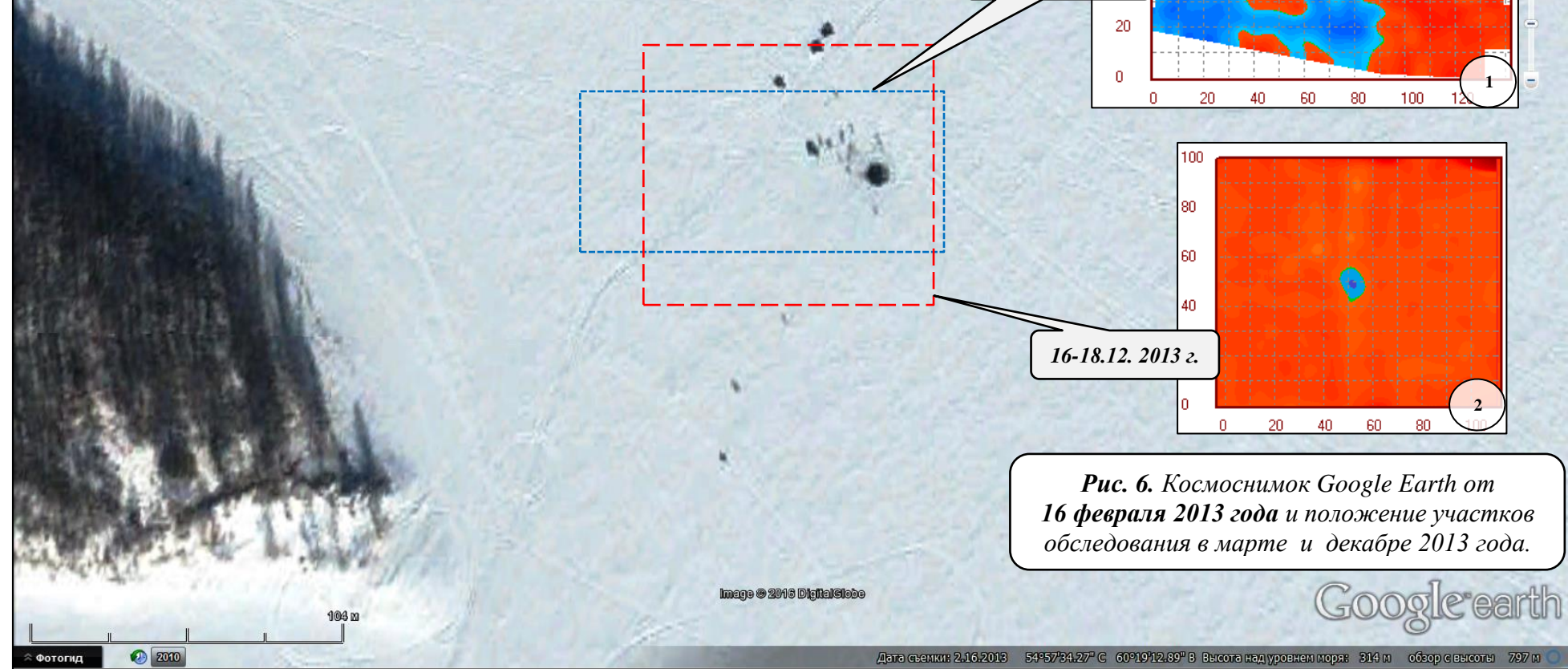
По нашей интерпретации, первое углубление, это след первого удара фрагмента метеорита о дно озера Чебаркуль. Второе углубление это след второго удара (рикошета) метеорита о дно озера.

К сожалению, «запас» при выборе размеров площадки обследования оказался недостаточным. Возможно, существует и третий след удара (рикошета) метеорита.



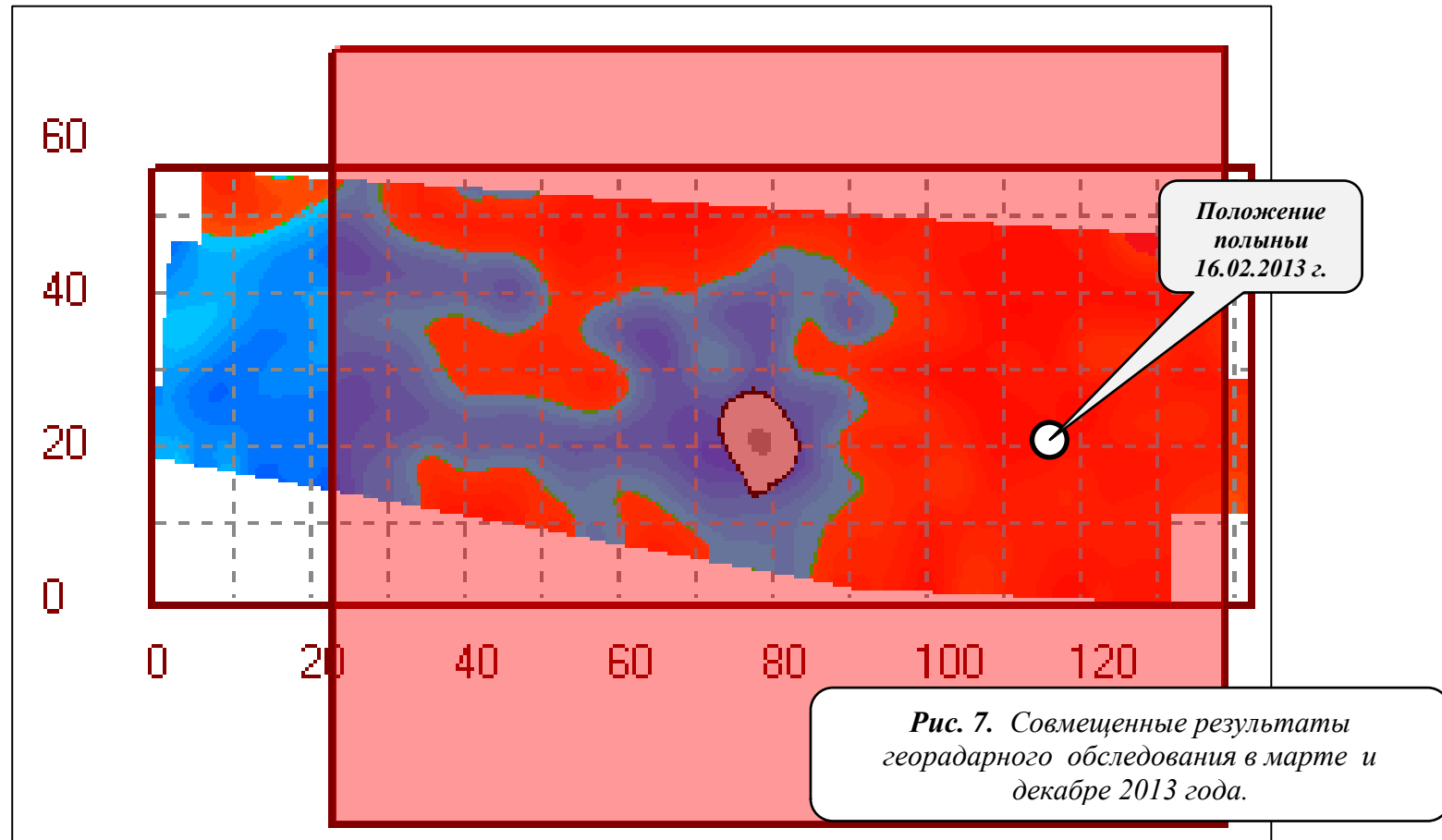
*Рис. 5. Реконструкция пути фрагмента метеорита Челябинск под водой озера Чебаркуль по результатам георадарного обследования.*

Координаты (GPS Garmin) георадарных профилей и площадок позволяют совместить результаты обследований, выполненных в марте (1) и декабре (2) 2013 года. Георадарные данные представлены в одинаковых настройках обработки и отражены одной и той же палитрой цветов в виде горизонтальных сечений на уровне дна озера. Цвета **красно-оранжевой палитры** мы интерпретируем, как ненарушенную или восстановившуюся (заплывшую илом) часть дна. Цвета **синеголубой гаммы** отражают существенные (2-3 метра) углубления в дне. В марте 2013 года (1), через месяц после падения метеорита, георадар зафиксировал обширные нарушения (ямы) в дне озера на запад от полыньи. Через 10 месяцев после падения метеорита на этом же участке дна зарегистрировано одно существенное углубление круглой формы, диаметром до 10 метров.



*Рис. 6. Космоснимок Google Earth от 16 февраля 2013 года и положение участков обследования в марте и декабре 2013 года.*

Точное координатное совмещение георадарных результатов показывает, что единственное значительное углубление, зарегистрированное в декабре, располагается в месте, где в марте, регистрировалось обширное углубление, проинтерпретированное нами, как след первого удара о дно фрагмента метеорита. По какой-то причине, это углубление сохранилось до декабря, хотя остальные нарушения дна, заплыли илом и выровнялись. Факт наличия такого углубления (2-3 м) можно объяснить только тем, что в этом месте, совсем недавно, проводились работы по размыву, и яма еще не успела заилиться.



Из хронологии 2013 года следует, что образование и существование глубокой ямы на запад от полыньи (повторная георадарная съемка) может быть связано только с последним событием поискового сезона – обнаружением и подъемом фрагмента метеорита весом в ~600 кг. Следы поисковой деятельности водолазов за летний период скрыты илом, и только следы работ в середине октября еще сохранились в рельефе дна.

**Хронология событий и участия экспедиции ИЗМИРАН-ВНИИСМИ в обследовании места падения фрагмента метеорита «Челябинск»:**

1. **15 февраля 2013 г.** – падение крупного фрагмента метеорита «Челябинск» в западной части озера Чебаркуль. На месте падения во льду образовалась овальная полынья размером 6 x 8 метров.
2. **12-14 марта 2013 г.** - участники экспедиции ИЗМИРАН-ВНИИСМИ сняли 36 георадарных профилей длиной по 100 - 120 метров в районе падения метеорита. Сетка георадарных профилей покрывает участок 100 x 100 м к западу от полыньи.
3. **Июнь 2013 г.** - доклад «Георадарное обследование места падения Чебаркульского фрагмента метеорита «Челябинск» на Международной конференции «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль» [1].
4. **Июль 2013 г.** - публикация результатов георадарных исследований в журнале «Геохимия», № 7, с. 636-642, «Георадарное обследование предполагаемого места падения фрагмента метеорита Челябинск в озеро Чебаркуль» [2].
5. **Сентябрь 2013 г.** – телефонный разговор мэра Челябинска **А.В. Орлова** и руководителя георадарной экспедиции **А.В. Попова**. Орлов сообщил об отсутствии результатов за летний период работы поисковой подводной экспедиции, Попов А.В. порекомендовал продолжить водолазные работы в западном секторе от места положения полыньи в соответствии с георадарными результатами.
6. **16 октября 2013 г.** - крупный осколок метеорита «Челябинск» был поднят со дна озера Чебаркуль. Первоначальный вес осколка составил 510 кг, при подъеме часть (63 кг) метеорита откололась и в настоящее время в Челябинском краеведческом музее экспонируется фрагмент весом 401 кг [3].
7. **16-18 декабря 2013 г.** – повторная георадарная съемка места падения фрагмента метеорита «Челябинск» по льду озера Чебаркуль. Обследование выполнено участниками экспедиции ИЗМИРАН-ВНИИСМИ.
8. **Февраль 2014 г.** - доклад на Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск – год на Земле», «Георадарное обследование места падения фрагмента метеорита Челябинск» [4].



**Заключение:** В результате площадного георадарного обследования на дне озера Чебаркуль обнаружены углубления и нарушения в поверхности дна озера. Первое углубление расположено на расстоянии 40 метров от проекции полыньи, второе углубление в дне озера расположено на расстоянии 95 метров от проекции полыньи. Проведенная реконструкция траектории основного фрагмента метеорита в толще воды и придонного ила дает основания для предположения, что обнаруженные углубления на дне озера и есть следы его первого удара о дно и возможного рикошета. С помощью георадара зарегистрированы аномальные структуры, примерзшие к нижней кромке ледового покрова озера. Эта структура состоит из обломков льда полыньи, которые захватил метеорит при ударе. Факт наличия такого феномена, заметно подкрепляет достоверность предложенной нами схемы реконструкции движения фрагмента метеорита после удара его о лед озера Чебаркуль.

Сопоставление результатов георадарного обследования в марте и декабре 2013 года показало, что до декабря на дне обследованного участка сохранилось только одна яма, которая расположена в центре заиленного обширного углубления, которое мы проинтерпретировали, как место первого удара фрагмента метеорита о дно. Сохранность и рельефность ямы, свидетельствует о том, что ее недавно размыли. Утверждать, что именно из этой ямы был поднят фрагмент метеорита (600 кг), мы не можем, но вероятность этого существует.

Во-первых, большой фрагмент метеорита был быстро найден после разговора А.В. Орлова и А.В. Попова, после четырех месяцев безрезультатных поисков. Во-вторых, следы последних водолазных работ сохранились только в одном месте, совпадающем с местом первого удара метеорита о дно озера (по нашей интерпретации).

Мы убеждены, что наша реконструкция траектории падения фрагмента метеорита «Челябинск» правильно восстанавливает события 15 февраля 2013 года. Очень надеемся, что большой фрагмент метеорита найден и с нашей помощью. Остальные фрагменты метеорита Челябинск, упавшие в озеро Чебаркуль, покоятся на дне в месте первого и второго ударов и надежно укрыты илом.



**Руководитель экспедиции:** д. ф.-м. н. Попов А.В. (ИЗМИРАН).

**Участники экспедиции:** к. ф.-м. н. В.В. Копейкин (ИЗМИРАН),  
С.В. Меркулов, П.Л. Воровский (ВНИИСМИ),  
к. ф.-м. н. В.А. Алексеев (ТРИНИТИ).

**Подготовка материалов, обработка георадарных данных:** к. ф.-м. н. П. А. Морозов.

**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН).  
ООО «Компания ВНИИСМИ».**

## Литература:

1. Копейкин В.В., В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, В.Б. Бузин, С.А. Гудошников, В.С. Скомаровский, А.И. Беркут, С.В. Меркулов; В.А. Алексеев. Георадарное обследование места падения Чебаркульского фрагмента метеорита «Челябинск». Доклад на международной конференции «**Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль**», г. Чебаркуль, июнь 2013.
2. В.В. Копейкин, В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов, В.А. Алексеев. «**Георадарное обследование предполагаемого места падения фрагмента метеорита Челябинск в озеро Чебаркуль**», Геохимия, № 7, с. 636-642, 2013.
3. В.В. Копейкин, В.Д. Кузнецов, П.А. Морозов, А.В. Попов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов, В.А. Алексеев. «**Георадарное обследование места падения фрагмента метеорита Челябинск**», Сборник Всероссийской научной конференции «**Метеорит Челябинск – год на Земле**», с. 286-293, Челябинск, февраль 2014.
4. А.В. Овчаренко «**Определение объема и веса музейного экспоната метеорита «Челябинск» на основе 3d-сканирования**», Институт Геофизики Уральского отделения РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГФ УрО АНО, Екатеринбург), 24.05.2014.
5. Интервью участников экспедиции на льду озера Чебаркуль: <https://youtu.be/HiKWob7EB2I>
6. В.В. Копейкин. Эпизод 32. Челябинский метеорит (ссылка на раздел «Случаи из практики»).