

УДК 681.84/85

## АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ ЧЕБАРКУЛЬСКОГО МЕТЕОРИТА НА ИНФРАЗВУКОВЫХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

15 февраля 2013 года сеть сейсмических и инфразвуковых станций Казахстана записала сигналы от взрыва болида в районе г. Челябинск. По записям инфразвуковых станций выявлены и исследованы сигналы от взрыва болида, определены кажущиеся скорости, частотные полосы, азимуты прихода сигнала. По сейсмическим станциям установлено время и место удара о Землю звуковой волны, магнитуда сейсмического события. Показано, что это событие является вторым по силе после падения Тунгусского метеорита в 1908 г.

### ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 года примерно в 9:20 по местному времени (03:20:33 GMT) в атмосфере в районе г. Челябинск произошел взрыв метеорного тела. Болид вошел в атмосферу Земли незамеченным на скорости примерно 18 – 19 км/сек. Спустя примерно 32,5 секунды после входа в атмосферу небесное тело разрушилось над территорией Южного Урала на высоте примерно 15–25 км. Разрушение представляло собой серию событий, сопровождавшихся распространением ударных волн и ярким свечением. Осколки болида разлетелись по нескольким районам области. Точкой падения самого большого осколка считается озеро Чебаркуль.

Первыми движение тела по небу в 9:15 увидели жители Костанайской и Актюбинской областей Казахстана. Жители Оренбурга – в 9:21 по местному времени. Также его след наблюдался в Свердловской, Курганской, Тюменской, Челябинской областях и Башкортостане. Самой далёкой точкой с видеофиксацией полёта болида является район посёлка Просвет в Волжском районе Самарской области. Расстояние до Челябинска составляет 750 км.

От ударной волны были повреждены стекла в 7320 зданиях, большинство из них – жилые дома. За медицинской помощью обратилось 1613 южноуральцев, из них 69 человек пришлось госпитализировать. Материальный ущерб был предварительно оценён от 400 млн. до 1 млрд. рублей.

16 февраля члены метеоритной экспедиции Уральского федерального университета обнаружили в районе озера Чебаркуль фрагменты метеорита. В результате химических анализов была подтверждена внеземная природа мелких камней, найденных на поверхности озера Чебаркуль, и доказано, что это обыкновенный хондрит [1].

Это уникальный объект, изучением которого занялись люди разных специальностей как научного, так и ненаучного мира, так как события такого масштаба происходят в мире крайне редко.

Явление наблюдали сотни тысяч человек, оно было зафиксировано большим числом видеорегистраторов и камер наблюдения.

Настоящая работа посвящена обнаружению и детальному анализу сигналов от взрыва болида по записям казахстанских станций. Это уникальное явление должно быть изучено именно по инструментальным записям в различных физических полях (инфразвук, сейсмические колебания и др.).

### ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЧЕБАРКУЛЬСКОМ МЕТЕОРИТЕ

По расчетам НАСА в 03:20:33 GMT метеорит диаметром около 17 – 20 метров и массой порядка 10 тыс. тонн вошёл в атмосферу Земли на скорости около 18,6 км/с и взорвался на высоте 23.3 км [2]. Максимальное свечение было отмечено в точке с географическими координатами 54.8° с. ш. 61.1° в. д. Приблизительная энергия основного взрыва по оценкам НАСА составила около  $3.75 \cdot 10^{14}$  Дж, что эквивалентно 90 кТ в тротиловом эквиваленте. По оценкам НАСА, это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю со времени Тунгусского метеорита в 1908 году и соответствует событию, происходящему в среднем раз в 100 лет.

Рисунок 1 показывает трассу пролета болида от начала вхождения в атмосферу до взрыва над поверхностью. Вдоль трассы показаны высоты, красной звездочкой показано место взрыва [2].

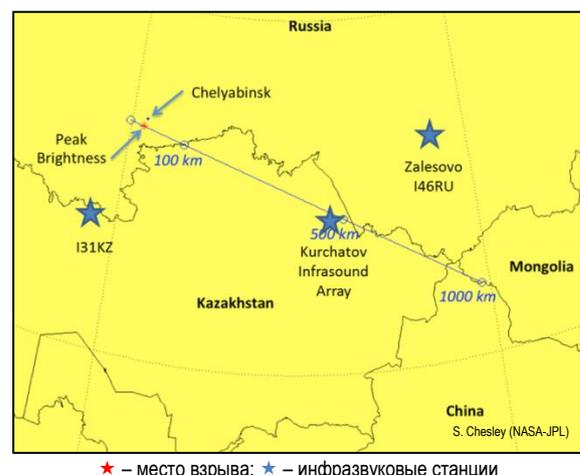


Рисунок 1. Карта трассы пролета метеорного тела с изменением высот

Ядерный взрыв и взрыв болида в атмосфере создают низкочастотные звуковые колебания (меньше 20 Гц), которые можно использовать для определения параметров события. Данные расположенных по всему миру инфразвуковых станций слежения за ядерными испытаниями (ОДВЗЯИ) показали наличие источника инфразвуковых волн в Уральских горах, что позволило сделать оценки его мощности. Среди всех событий это было наиболее мощным со времени ввода в строй первой инфразвуковой станции в 2001 году. До февраля месяца, взрыв болида над Сулавеси в Индонезии в октябре 2009 г. был самым сильным инфразвуковым событием, записанным 15 станциями сети ОДВЗЯИ. Взрыв болида 15 февраля 2013 года записан 17 инфразвуковыми станциями и превзошел событие в Сулавеси по интенсивности сигналов.

Этот источник инфразвука оказался нестационарным, как было бы при испытании ядерного оружия в шахте, а перемещался, что было отмечено по изменению направления на источник. Самая дальняя станция, которая зафиксировала событие, расположена в Антарктиде в 15 000 км от источника. Самой близкой инфразвуковой группой оказалась IS31 Актюбинск (рисунок 1). Данная станция позволила более детально изучить сигнал и определить параметры взрыва и сопутствующих ему явлений (Рисунок 2). Важность полученной записи на инфразвуковой станции IS31 Актюбинск была отражена в пресс-релизе ОДВЗЯИ, опубликованном на следующий день после события [3].

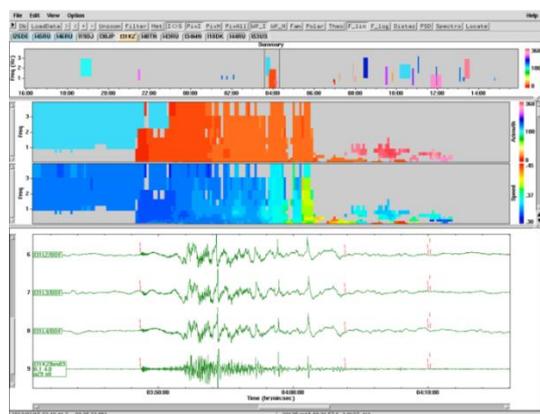


Рисунок 2. Волновые формы инфразвуковых волн, записанные станцией IS31 Актюбинск (ОДВЗЯИ), опубликованные в пресс-релизе ОДВЗЯИ на следующий день после события.

В пресс-релизе приведен фрагмент записи станции IS31 Актюбинск (рисунок 2). Начало записи низко-частотных звуковых волн от взрыва соответствует 03:22 GMT 15 февраля 2013 г.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПИСЕЙ СИГНАЛОВ ОТ МЕТЕОРИТА НА КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЯХ

В казахстанскую сеть РГП ИГИ входят две инфразвуковые станции. Инфразвуковая станция IS31

Актюбинск расположена на северо-западе Казахстана (рисунок 3) [4]. Группа состоит из 8 элементов, оснащенных микробарометрами MB2000, апертура группы 2 км (рисунок 4).

Инфразвуковая станция Курчатов «KURIS» [5] расположена в районе г. Курчатов Восточно-Казахстанской области (рисунок 3). Она состоит из 4 элементов, использованы микробарометры MB2005 (рисунок 5).

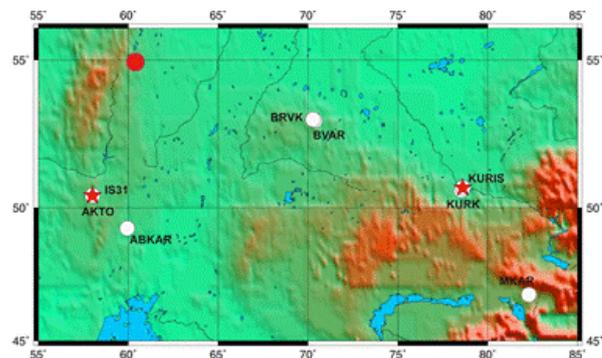


Рисунок 3. Расположение сейсмических (○) и инфразвуковых станций (★) сети РГП ИГИ на территории Казахстана, зарегистрировавших болид (● – ориентировочное место эпицентра взрыва болида)

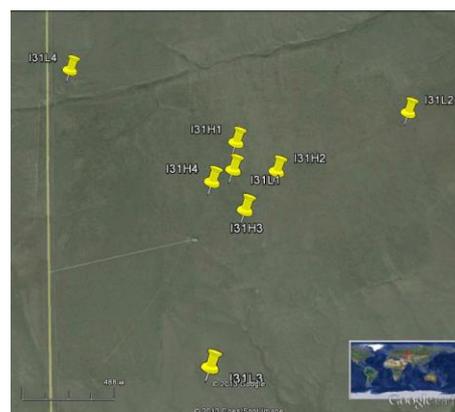


Рисунок 4. Конфигурация инфразвуковой группы IS31 Актюбинск



Рисунок 5. Конфигурация инфразвуковой группы Курчатов «KURIS»

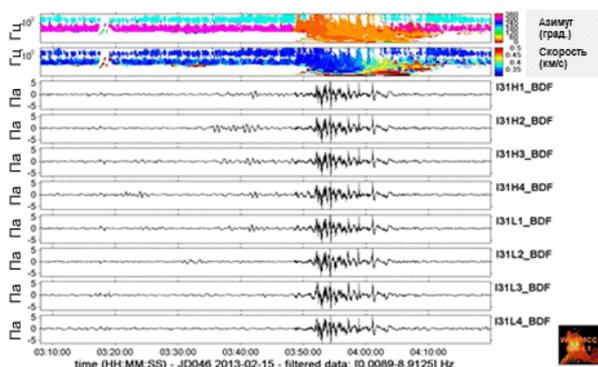
Инфразвуковая станция IS31 Актюбинск расположена примерно в 520 км от взрыва. Время вступления инфразвуковых фаз от взрыва болида 03:48 GMT. Данные станции IS31 Актюбинск поступают по спутниковому каналу, в режиме реального времени в Международный центр данных (г. Вена), а затем в Казахстанский Национальный центр данных (г. Алматы), где они систематически обрабатываются и анализируются.

Инфразвуковая станция «KURIS» расположена в 1300 км, время вступления инфразвуковых фаз от взрыва болида 04:28 GMT. Время пробега инфразвука составило около 26 минут для станции IS31 и 1 час 6 минут для станции Курчатова. Данные станции передаются в центр сбора информации. Затем информация через интернет каналы передается в ЦСОССИ.

Результатами обработки сигналов обеих инфразвуковых станций являются автоматические бюллетени, которые создаются в Центре данных за каждые сутки. В бюллетенях как станции Актюбинск, так и Курчатова были найдены детектирования, соответствующие взрыву болида. Именно эти отрезки записей анализировались более подробно.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА РМСС

Сейсмическая и инфразвуковая сеть Казахстана зарегистрировали взрыв Чебаркульского болида наилучшим образом. Самой близкой в мировой сети к эпицентру оказалась инфразвуковая группа IS31 Актюбинск, она расположена примерно в 520 км к югу от него. Азимут от группы на эпицентр около  $16^\circ$ . Такое удачное расположение позволило записать сигнал в самом широком частотном диапазоне, с самым большим количеством деталей.

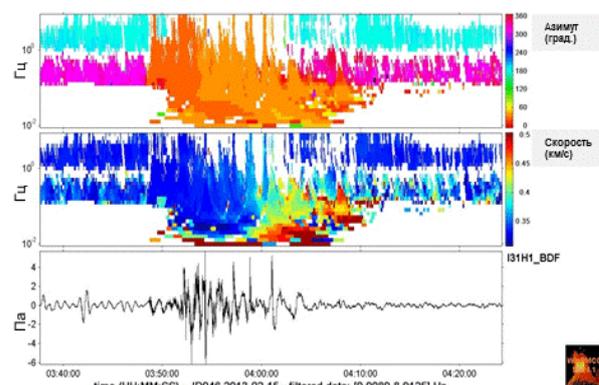


Верхний график – азимуты на источники инфразвуковых сигналов, второй сверху – кажущиеся скорости, нижние восемь графиков записи инфразвука на элементах группы. В волновых формах с 3:48:00 чётко виден сильнейший сигнал от взрыва болида

Рисунок 6. Обзорный вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции IS31 и результат применения РМСС детектора

На рисунке 6 показан обзорный вид записи сигналов от взрыва болида группой IS31. Кроме того, что станция была расположена ближе всех к эпицентру,

в этот день, в это время суток в районе её расположения были идеальные условия для регистрации инфразвука. Основным источником шума для инфразвука являются ветровые помехи [6]. На рисунке 6 видно, что станция до и после взрыва детектировала североатлантические микробаромы [7] (азимут на источник около  $300^\circ$ ) и сигналы от газовых факелов Жанажол [8] (азимут на источник около  $190^\circ$ ). Это говорит о том, что в это время ветровые помехи были очень слабы. В 3 часа 48 минут по Гринвичу на всех восьми каналах станции вступил мощнейший сигнал от взрыва болида. Сигналы от него регистрировались в течение 24 минут.



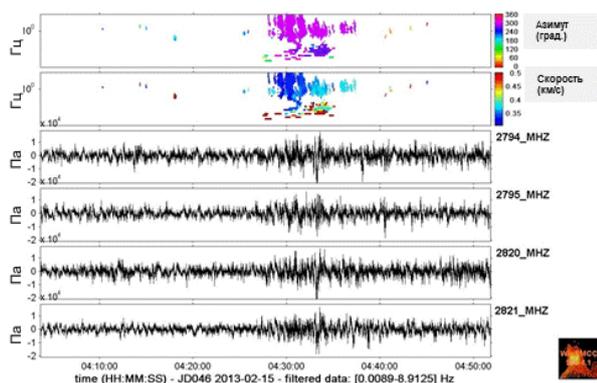
На верхнем графике показан результат расчета азимута на источник, на среднем – результат расчета кажущейся скорости сигнала. Внизу показана запись сигнала на канале H1 инфразвуковой группы IS31 Актюбинск

Рисунок 7. Детальная картина записи сигналов от взрыва Чебаркульского болида

На рисунке 7 показана детальная картина записи сигналов от взрыва. Нижний график на рисунке – это волновая форма от взрыва на канале H1 инфразвуковой группы IS31. Сигнал вступил в 3:48, сначала с относительно небольшой амплитудой. В 3:52 амплитуда сигнала резко возросла, всего видно 5 N волн. Параметры сигнала, рассчитанные методом РМСС, показаны на двух верхних графиках на рисунке 7. На верхнем графике показан результат расчета азимута на источник. Частотный спектр сигнала очень широк и выходит за пределы полосы 0,01–9 Гц, в которой производился расчет. Верхний предел полосы ограничен частотой Найквиста, которая при частоте дискретизации записи 20 Гц составляет 10 Гц. На верхнем графике рисунка 7 видно, что азимут на источник немного увеличивается от начала к концу сигнала. По-видимому, это обусловлено различной скоростью ветра на разных высотах преломления инфразвуковых волн. Такие различия в скорости приводят к различным отклонениям детектированного азимута от истинного [9]. Первыми пришли стратосферные фазы сигнала, преломляющиеся на высоте менее 50 км, ближе к концу записи детектированы, по-видимому, термосферные фазы, преломившиеся на большей высоте. Подтверждением этой гипотезы служит информация о кажущейся

скорости, представленная на среднем графике. На графике видно, что примерно в течение 12 минут в области высоких частот кажущиеся скорости составляли около 0,35 км/с, что характерно для стратосферных фаз [9]. Позднее кажущиеся скорости увеличились примерно на 400 м/с и более, это говорит о том, что эти фазы были преломлены на большей высоте. Большой разброс найденных значений азимутов и скоростей в области самых низких частот говорит о том, что для надёжного детектирования сигналов в области этих частот апертура инфразвуковой группы уже мала.

Сигналы от взрыва были детектированы ещё одной казахстанской инфразвуковой станцией, установленной в г. Курчатове. Это третья ближайшая к эпицентру инфразвуковая группа (вторая – российская станция I43RU, Дубна). Расстояние от эпицентра до Дубны составляет 1 090 км, до Курчатова 1 300 км, соответственно. Азимут от инфразвуковой группы «KURIS» на эпицентр составляет 298°. Вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции в Курчатове и результат применения РМСС детектора показаны на рисунке 8.



Верхний график – азимуты на источники инфразвуковых сигналов, второй сверху – кажущиеся скорости, нижние четыре графика – записи инфразвука на элементах группы

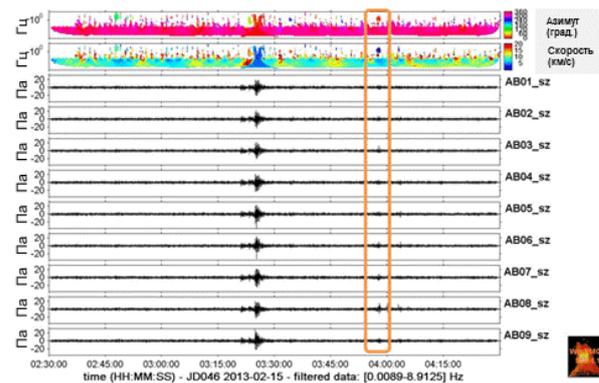
Рисунок 8. Вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции «KURIS» и результат применения РМСС детектора

На рисунке видно, что станция не детектировала в это время микробаромы. Это говорит о том, что в районе её установки были сильные ветровые помехи. Вид волновых форм подтверждает это, сигнал визуально выделяется на фоне не очень четко. Результаты применения детектора РМСС показывают, что записи, тем не менее, содержат ценную информацию об источнике. Картина распределения по времени и частоте найденных азимутов и кажущихся скоростей в целом похожа на результаты, полученные для IS31 Актюбинск. Однако хорошо заметно, по крайней мере, одно важное отличие. Детектирования в области низких частот на станции Курчатова образуют отдельный кластер. Таким образом, по записям этой станции можно выделить уже не две, как в Актюбинске, а три инфразвуковых фа-

зы. По-видимому, в области низких частот регистрируются акустико-гравитационные волны [10].

Помимо инфразвуковых станций болид был зарегистрирован также и сейсмическими станциями мониторинговой сети ИГИ. На рисунке 9 показаны вид сигналов от Чебаркульского болида на сейсмической группе Акбулак и результат применения РМСС детектора. Сейсмический сигнал от удара о землю звуковой волны под местом взрыва четко виден в волновых формах в 3:22:00 по Гринвичу. Значительно позднее, около 4:00:00 GMT в волновых формах видны записи инфразвукового сигнала, записанного сейсмической станцией. Такая разница во времени регистрации сейсмического и акустического сигналов объясняется тем, что инфразвук распространяется значительно медленнее, чем сейсмические сигналы.

Помимо группы Акбулак, сейсмический сигнал от взрыва болида записали группы Боровое, Каратау, Маканчи и другие станции. Положение эпицентра, полученное по данным сейсмических групп ИГИ, очень хорошо совпадает с данными других источников.



В оранжевой рамке – волновые формы и детектирования инфразвука от челябинского болида, сейсмический сигнал от взрыва записан группой в 3:22:00

Рисунок 9. Вид сигналов от Чебаркульского болида на сейсмической группе Акбулак и результат применения РМСС детектора

Определено значение  $T_0$  – времени достижения звуковой волной от взрыва поверхности Земли. Оно равно 03:21:59.64 GMT. Разница между временем взрыва по расчетам НАСА 03:20:33 GMT и временем  $T_0$  удовлетворительно соответствует определениям высоты взрыва (23 км). Этот метод можно использовать для определения высоты источника.

По сейсмическим данным удалось определить магнитуду и энергию сейсмического события. Магнитуда  $M_b = 3.5$ , энергетический класс  $K = 8.4$ . Для сравнения отметим, что магнитуда по сейсмическим данным Тунгусского метеорита равна 5,0.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Казахстанские станции мониторинга ядерных испытаний зарегистрировали сигналы от взрыва Чебаркульского болида 15 февраля 2013 г. Причем

благоприятное географическое расположение станций казахстанской сети позволило получить самую существенную информацию о событии, казахстанские станции расположены ближе всех к эпицентру.

Уже начальные стадии интерпретации болида позволили уточнить информацию о координатах эпицентра взрыва болида, о частотном составе инфразвуковых и сейсмических сигналов от него. Получены предварительные данные об инфразвуковых

фазах от события. Произведена парадоксальная регистрация инфразвуковых сигналов сейсмической группой.

Следует отметить, что на данном этапе проведена только начальная интерпретация сигнала от взрыва болида. Дальнейшее изучение этого мощнейшего сигнала очень ценно как для задач мониторинга, так и для изучения физики болидов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пинкус, М. В Челябинской области обнаружены новые фрагменты метеорита/ М. Пинкус //Челябинская область: Российская газета. – 2013. – 20 фев.
2. Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013 [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball\\_130301.html](http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html).
3. Пресс-релиз Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/>.
4. Демин, В.Н. Новая инфразвуковая станция международной системы мониторинга ОДВЗЯИ Актюбинск (IS31) / В.Н. Демин, В.Г. Кунаков, А.А. Смирнов // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий: тезисы докладов. Междунар. конф., Боровое, Казахстан: 12 – 16 августа 2002 г. – Курчатов, 2002. – С. 11.
5. Инфразвуковые станции КНЦД [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kndc.kz/index.php/ru/observation-network-menu-ru/infrasound-stations-menu-ru/kuris-menu-ru>.
6. Walker, K.T. and Hedlin, M.A.H. In: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*/ A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne (Eds.)//Springer, – 2010. ISBN: 978-1-4020-9507-8.–P. 141–184.
7. Объяснение природы источников когерентных низкочастотных сигналов, регистрируемых мониторинговой сетью НЯЦ РК / А.А. Смирнов, ЛеПишон А., Гильберт Ж. // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 3. – С. 76–81.
8. Сезонные вариации инфразвуковых сигналов от газовых факелов: наблюдение и моделирование / А.А. Смирнов, В.И. Дубровин, Л. Эверс // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 3. – С. 70–75.
9. Garces, M. A., Hansen, R. A. and Lindquist, K. G. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere, *Geoph. J. Int.*, 135, 255–263.
10. Evers, L.G. and Haak, H.W. In: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*/ A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne (Eds.)//Springer, – 2010. ISBN: 978-1-4020-9507-8.–P. 3–27.

#### ЯДРОЛЫҚ МОНИТОРИНГТІҢ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫНДАҒЫ ШҰБАР КӨЛ МЕТЕОРИТТІҢ ЖАЗБАЛАРЫН ТАЛДАУ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан*

2013 жылғы 15 ақпанда Қазақстанның сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялар желісі Челябинск қ. ауданында болид жарылысынан сигналдарын жазып алған. Инфрадыбыстық станциялардың жазбалары бойынша болид жарылысынан сигналдары айқындалған және зерттелген, көзге көрінетін жылдамдықтары, жиіліктік жолағы, сигнал түсу азимуты анықталған. Сейсмикалық станциялары бойынша дыбыстық толқыны Жерге соғылу уақыты мен орны, сейсмикалық оқиғаның магнитудасы белгіленген. Бұл оқиға 1908 ж. Тунгус метеориті құлаудан кейін құлау күші бойынша екіншісі болып табылатыны көрсетілген.

#### THE RECORDS ANALYSIS OF THE CHEBARKULSKY METEORITE AT INFRASOUND ARRAYS OF NUCLEAR MONITORING

V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov

*Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan*

On February 15, 2013 the network of seismic and infrasound arrays of Kazakhstan recorded signals from fireball explosion around Chelyabinsk. Using infrasound station records the signals from fireball explosion were detected and investigated, apparent velocity, frequency bands, azimuths of signal arrival were determined. Using seismic stations data the time and place of acoustic wave ground impact and magnitude of seismic event were determined. This event is the second by its force after falling of Tungus meteorite in 1908.