

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО ИНФРАЗВУКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

***Ю.С. Рыбнов<sup>1</sup>, О.П. Попова<sup>1</sup>, В.А. Харламов<sup>1</sup>, А.В. Соловьев<sup>2</sup>,  
Ю.С. Русаков<sup>3</sup>, А.Г. Глухов<sup>4</sup>, Е. Silber<sup>5</sup>, Е.Д. Подобная<sup>6</sup>, Д.В. Суркова<sup>6</sup>***

<sup>1</sup> Институт динамики геосфер РАН,

<sup>2</sup> Томский государственный университет,

<sup>3</sup> НПО «Тайфун», <sup>4</sup> ФГКУ «12 ЦНИИ» МО,

<sup>5</sup> University of Western Ontario, London, Ontario, Canada,

<sup>6</sup> МФТИ, Институт динамики геосфер РАН

Приведены результаты регистрации инфразвука от Челябинского болида акустическими станциями, расположенными на территории России и Казахстана. Дана оценка энергии болида и определены координаты его разрушения в атмосфере по инфразвуковым данным. Энергия болида, оцененная по двум методикам, находится в диапазоне  $415 \pm 97$  кТ и  $445 \pm 142$  кТ, а местоположение его разрушения расположено между пунктами Коркино–Еманжелинск–Первомайский.

## Введение

Челябинский болид 15 февраля 2013 г. достиг максимальной яркости примерно в  $\approx 03:20$  по UT. Метеороид пролетел приблизительно в 30–35 км южнее г. Челябинска на высоте  $\approx 24\div 30$  км [Bogovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013], его разрушение сопровождалось яркой вспышкой, которая хорошо была видна на расстояниях в десятки и сотни километров [Емельяненко и др., 2013].

При движении и разрушении космических тел в атмосфере Земли происходят процессы быстрого освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме, что приводит к созданию области с высоким давлением и возникновению ударной волны в атмосфере [Цикулин, 1969; Немчинов, Адушкин и др., 2005]. С расстоянием ударная волна трансформируется в инфразвуковую, которая может распространяться на сотни и даже тысячи километров. В качестве относительной меры, характеризующей интенсивность возбуждаемой волны, вводится так называемый «тротиловый эквивалент» [Губкин, 1978]. Однако необходимо отметить, что это понятие является лишь мерой освободившейся энергии, и ни в какой мере не характеризует параметры акустической волны.

В настоящей статье рассмотрена возможность оценки энергии метеороида по данным регистрации инфразвуковых сигналов на эпицентральных расстояниях более 500 км. В работах [ReVelle, 1997; Цикулин, 1969] исследована возможность применения взрывной аналогии к оценке энергии болида. Показано, что на расстояниях порядка нескольких сотен километров инфразвуковые волны от космических тел по энергетическим характеристикам находятся в хорошем согласии с волнами от химических взрывов.

## Результаты натурных измерений

Для оценки энерговыделения при разрушении болида использовались материалы регистрации инфразвуковыми станциями, расположенными на территории Российской Федерации и Республики Казахстан. Данные по местоположению станций и расстояния до вероятного места разрушения болида приведены в таблице 1.

Таблица 1

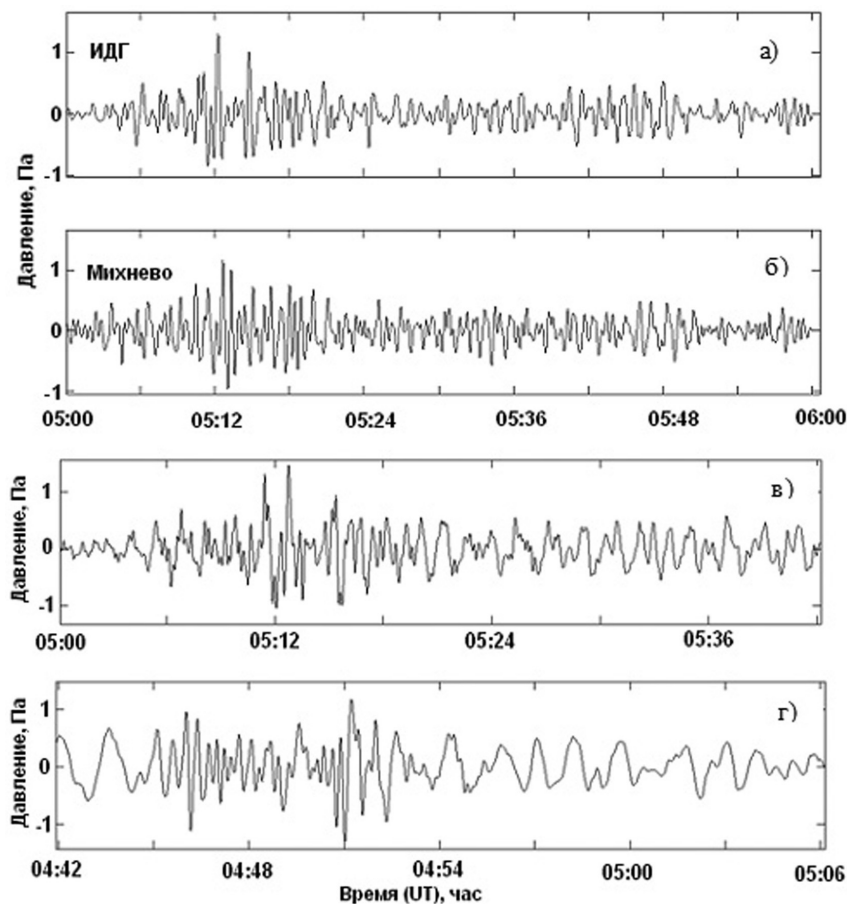
| Название станции                        | Координаты станции    | Расстояние до источника, км |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| IS43 (г. Дубна)                         | N = 56,7°, E = 37,3°  | $\approx 1513$              |
| IS44 (Камчатка)                         | N = 51,1°, E = 158,8° | $\approx 5780$              |
| IS46 (г. Залесово)                      | N = 53,9°, E = 84,8°  | $\approx 1520$              |
| IS31 (г. Актюбинск)                     | N = 50,4°, E = 58,0°  | $\approx 520$               |
| ГФО ИДГ РАН «Михнево» (Московская обл.) | N = 54,9°, E = 37,7°  | $\approx 1500$              |
| Здание ИДГ РАН (г. Москва)              | N = 55,7°, E = 37,6°  | $\approx 1500$              |
| НПО «Тайфун» (г. Обнинск)               | N = 55,1°, E = 36,6°  | $\approx 1520$              |
| ТГУ (г. Томск)                          | N = 56,5°, E = 84,9°  | $\approx 1500$              |

Инфразвуковые станции Международной системы мониторинга «Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty» (CTBT) оснащены микробарометрами MB2000 (Фран-

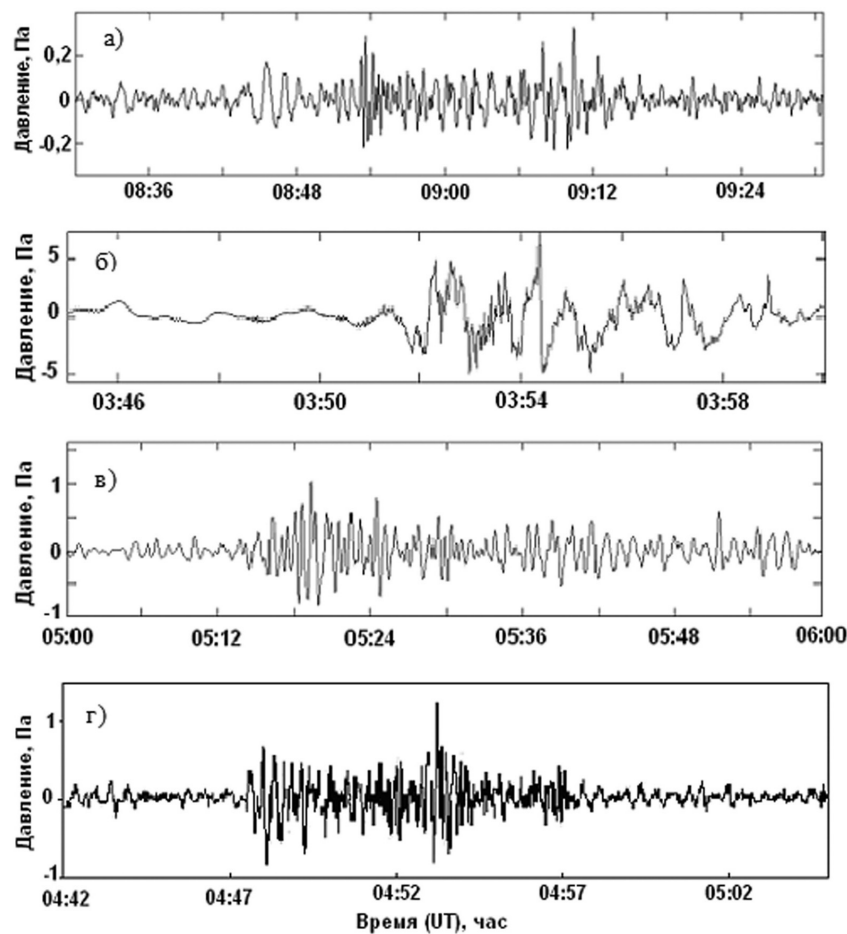
ция) с полосой пропускания 0–47 Гц. Геофизическая обсерватория (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» и здание ИДГ РАН оснащены микробарометрами с полосой пропускания 0,0003–10 Гц. В Обнинске и Томске установлены микробарометры с полосой пропускания 0,003–10 Гц. Волновые формы зарегистрированных сигналов приведены на рисунках 1, 2.

### Оценка энергии Челябинского болида

Для оценки энергии источника были проанализированы инфразвуковые сигналы от воздушных взрывов, проведенных на высотах  $h \sim 35q^{1/3}$ , где  $q$  – тротиловый эквивалент в кТ,  $h$  – высота в м [Stevens et al., 2006]. Тротиловый эквивалент взрывов находился в диапазоне от 10 до 2400 кТ. Сигналы регистрировались на эпицентральных расстояниях от 500 до 3000 км. При этом  $\approx 40\%$  сигналов было зарегистрировано в восточном направлении и  $\approx 40\%$  – в южном. Остальные 20% были зарегистрированы на западном и северном направлениях.



**Рис. 1.** Волновая форма сигналов зарегистрированных: а) в ИДГ РАН; б) ГФО «Михнево»; в) инфразвуковой станцией IS43 (Дубна, Московская обл.); г) инфразвуковой станцией IS46 (Залесово, Алтайский край)



**Рис. 2.** Волновая форма сигнала зарегистрированного инфразвуковой станцией: а) IS44 (Камчатка); б) IS31 (Актюбинск, Казахстан); в) НПО «Тайфун» (Обнинск, Калужская обл.); г) в Томском государственном университете (Томск)

Оценки источника энергии для инфразвукового сигнала обычно опираются на эмпирические соотношения. Анализ сигналов, зарегистрированных на разных эпицентральных расстояниях, показал, что их амплитуда сильно зависит от:

- скорости и направления ветра на высоте стратосферы (40–60 км) и на высоте термосферы (90–120 км);
- направления на пункт регистрации;
- метеоусловий в месте регистрации.

Расчеты показывают, что погрешность оценки энергии взрыва может достигать 4–8 раз. Такой же вывод сделан в [Stevens et al., 2006], где анализировалась зависимость энергии источника от амплитуды инфразвуковой волны на различных эпицентральных расстояниях.

Кроме того, в работах [Revelle 1997; Edwards et al., 2006; Edwards, 2010; Silber et al., 2009; Ens et al., 2012] исследовались инфразвуковые сигналы болидов. Из полученных эмпирических соотношений видно, что амплитуда сигнала варьируется на порядок и более для источника известной мощности. Стало очевидно, что ам-

плитудные параметры сигналов не могут быть положены в основу метода оценки энергии взрывного источника на больших расстояниях.

Анализ спектрограмм показал, что для каждого взрыва наблюдается характерная частота  $f_{\text{хар}}$ , превалирующая над другими. Значение  $f_{\text{хар}}$  в первом приближении определяется зависимостью вида [Stevens et al., 2006].

$$f_{\text{хар}} \approx \frac{K_f}{2\pi\sqrt[3]{E}}, \quad (1)$$

где  $E$  – тротильный эквивалент взрывного источника в кТ;  $K_f$  – коэффициент пропорциональности.

На рис. 3 приведены распределения вероятностей для коэффициентов  $K_f$ , построенные по экспериментальным данным [Stevens et al., 2006] для разных направлений распространения сигнала. Там же показаны аналитические выражения плотности вероятности. В качестве закона распределения выбран логнормальный. Для проверки эквивалентности выбранного закона распределения выборочным данным использовался критерий согласия хи-квадрат. Критерий согласия для направления восток-запад равен  $\approx 5,17$  при уровне значимости  $\approx 0,023$ , что не противоречит гипотезе о логнормальности закона распределения. Аналогичные оценки получаются для направления юг-север. Поэтому можно принять для распространения сигналов в направлении восток-запад  $K_f \approx 1,65^{+0,113}_{-0,113}$ , а для направления юг-север  $K_f \approx 1,21^{+0,195}_{-0,195}$ .

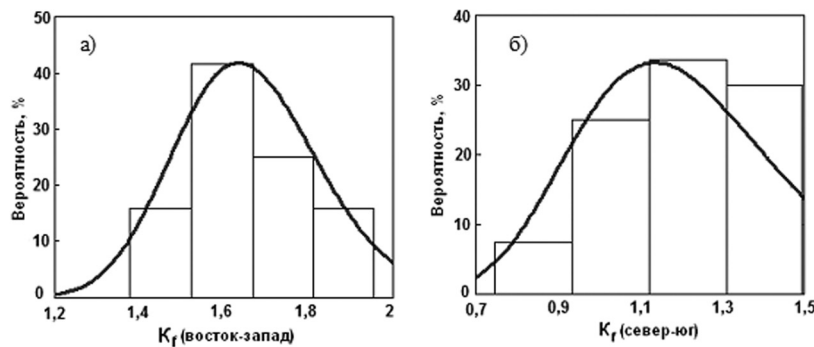


Рис. 3. Коэффициент  $K_f$  при распространении сигналов (а) в направлении восток-запад; (б) в направлении север-юг

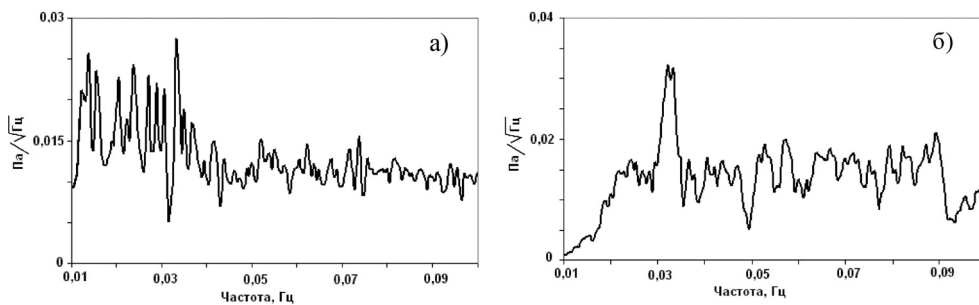


Рис. 4. Спектры сигналов зарегистрированных: а) в ИДГ РАН; б) в Обнинске

Для примера на рис. 4 приведены спектры сигналов, зарегистрированных в здании ИДГ и Обнинске. Характерные частоты инфразвуковых сигналов, зарегистри-

рованных акустическими станциями, приведены в таблице 2. Там же приведены оценки энергии источника, рассчитанные по уравнению (1).

Таблица 2

| Название станции                           | Характерная частота, Гц | Энергия боида, кТ |
|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| IS43 (г. Дубна)                            | $\approx 0,033$         | 407÷615           |
| IS44 (Камчатка)                            | $\approx 0,036$         | 314÷473           |
| IS46 (г. Залесово)                         | $\approx 0,035$         | 341÷515           |
| IS31 (г. Актюбинск)                        | $\approx 0,029$         | 173÷458           |
| ГФО ИДГ РАН «Михнево»<br>(Московская обл.) | $\approx 0,0326$        | 423÷638           |
| Здание ИДГ РАН (г. Москва)                 | $\approx 0,033$         | 407÷615           |
| НПО «Тайфун» (г. Обнинск)                  | $\approx 0,032$         | 447÷674           |
| ТГУ (г. Томск)                             | $\approx 0,039$         | 247÷372           |

Среднее значение энергии равно 445 кТ при стандартном отклонении  $\pm 142$  кТ. Из полученных оценок видно достаточно большое (до 2,7 раз) расхождение в определении мощности источника. По-видимому, такое различие обусловлено влиянием циркуляции воздушных масс на стратосферных высотах. Известно [Хргиан, 1986], что на высоте стратосферы в зимнее время года наблюдаются западные ветры, а летом – восточные. Их скорость может достигать 50 м/с и более. Такие ветры могут оказывать влияние на спектральный состав сигналов, распространяющихся по меридиану.

Дополнительные исходные данные по регистрации инфразвуковых сигналов позволили уточнить приведенные выше зависимости с учетом эпицентральных расстояний, азимутов на источник и моделей атмосферы для разных сезонов года. Объем выборки – около 100 сигналов от источников с  $q$  от 10 кТ до 10 000 кТ на расстояниях 500–5000 км [Stevens et al., 2006].

Получена функциональная зависимость вида [Ens et al.; 2012]

$$\lg q \approx a - b \cdot \lg f - c \cdot \lg R + d, \quad (2)$$

где  $f$  – частота в Гц,  $R$  – расстояние в км.

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  в уравнении (2) получены путем построения регрессивных зависимостей методом наименьших квадратов и равны:  $a \approx 0,65$ ,  $b \approx 2,3$ ,  $c \approx 0,49$ . Анализ показал, что основное влияние на оценку энергии источника оказывает коэффициент  $b$ , выборочное распределение которого близко к нормальному.

Влияние сезонных вариаций стратосферного ветра и азимута из источника на пункт регистрации учтены в виде добавки  $d$  к основной функциональной зависимости

$$d \approx K_1 \cdot K_2$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние сезонных вариаций скорости и направления ветра,  $K_2$  – коэффициент, учитывающий азимут из источника на пункт регистрации. Значения  $K_1$  и  $K_2$  определяются из графиков на рис. 5, которые построены в результате обработки данных, приведенных в работе Stevens et al. [2006].

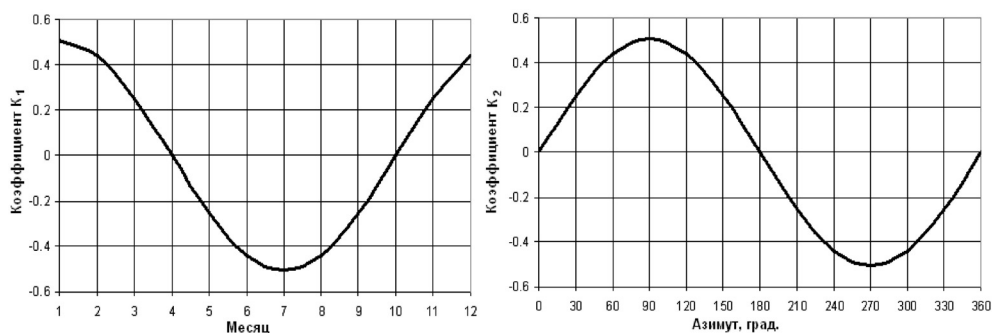


Рис. 5. Значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$

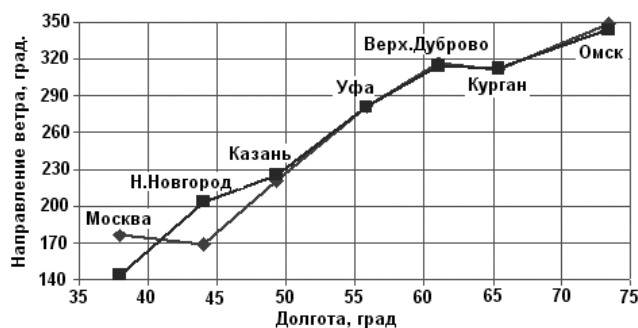


Рис. 6. Направления ветра по трассе сигнала (■ – 06 UT, ◆ – 18 UT)

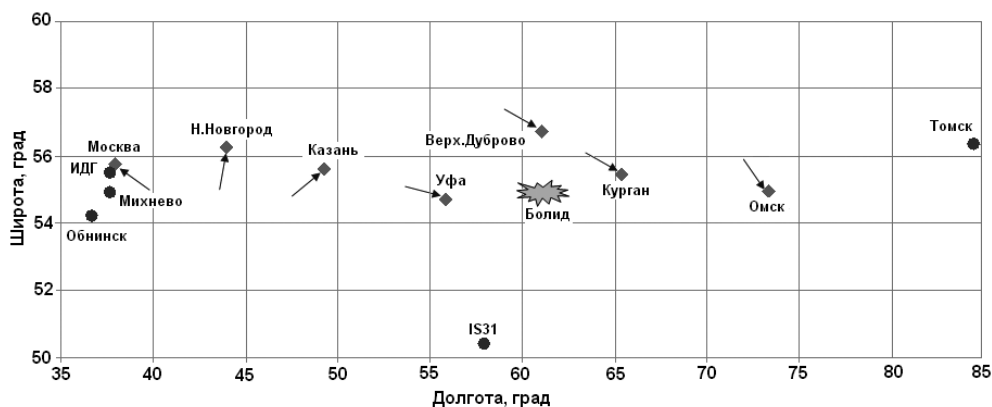


Рис. 7. Схема расположения метеостанций, пунктов регистрации и направлений ветра

Так, для февраля направление ветра принималось равным  $\approx 270^\circ$  (западный ветер). На рис. 6 показаны направления ветра 15.02.2013 г., полученные с метеостанций, расположенных по трассе распространения сигнала, как в восточном, так и в западном направлениях.

Полная схема ветров и расположение пунктов регистрации приведены на рис. 7. Как видно из рис. 7 при распространении сигнала на запад направление ветра менялось с  $\approx 290$  до  $\approx 144^\circ$  (среднее значение  $\approx 217^\circ$ ). По трассе распространения на

Томск направление ветра менялось с  $\approx 311$  до  $\approx 349^\circ$  (среднее значение  $\approx 321^\circ$ ), по трассе распространения на Камчатку и Залесово – менялось с  $\approx 220$  до  $\approx 300^\circ$  (среднее значение  $\approx 260^\circ$ ). С учетом этого были скорректированы коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  для оценки энергии болида.

Влияние скорости ветра оценивалось по данным метеостанций, приведенным на рис. 8. Расчеты показывают, что средняя скорость ветра равна  $\approx 23,3$  м/с.

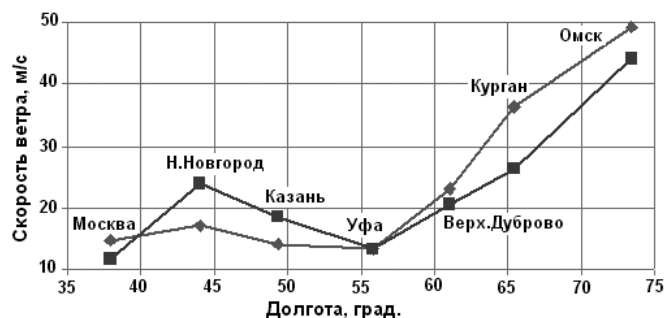


Рис. 8. Скорость ветра по трассе распространения сигнала (■ – 06 UT, ◆ – 18 UT)

Для контроля оценивалась скорость ветра по данным натурных измерений. Были взяты пункты ИДГ РАН и ТГУ. Оба пункта регистрации расположены практически в диаметрально противоположных направлениях и на одинаковых расстояниях от источника. Так, время разрушения болида равно  $\approx 03:20 \div 03:21$  по UT. Время прихода сигнала в ИДГ РАН равно  $\approx 05:05$  UT, а в Томск  $\approx 04:47$  UT. Расстояния от источника до указанных пунктов регистрации равны  $\approx 1500$  км. Соответственно, скорость распространения в западном направлении (в сторону ИДГ РАН) была равна  $\approx 240$  м/с, а восточном –  $\approx 287$  м/с. Расчеты показывают, что средняя скорость западного ветра была равна  $\approx 23,5$  м/с. Это хорошо совпадает с данными метеостанций.

При расчете коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  для данного месяца года закладывалась средняя скорость ветра равная  $\approx 25$  м/с. Данное обстоятельство говорит в пользу того, что оценки энергии, полученные с учетом реальной стратификации ветра (направление и скорость) по трассе распространения, являются достаточно надежными.

В таблице 3 приведены оценки энергии источника по данным измерений частоты в разных пунктах регистрации. Среднее значение энергии равно 415 кТ при стандартном отклонении  $\pm 97$  кТ.

Таблица 3

| Название станции                        | Энергия болида, кТ |
|-----------------------------------------|--------------------|
| IS43 (г. Дубна)                         | 442                |
| IS44 (Камчатка)                         | 221                |
| IS46 (г. Залесово)                      | 462                |
| IS31 (г. Актюбинск)                     | 534                |
| ГФО ИДГ РАН «Михнево» (Московская обл.) | 457                |
| Здание ИДГ РАН (г. Москва)              | 445                |
| НПО «Тайфун» (г. Обнинск)               | 474                |
| ТГУ (г. Томск)                          | 328                |

### Оценка местоположения источника

Для определения местоположения источника использовались данные регистрации с двух групп станций. Первая группа состоит из трех станций: ИДГ РАН – ГФО «Михнево» – НПО «Тайфун», которые образуют систему регистрации с базами 76–84–90 км. В качестве второй группы использовалась станция IS31, входящая в состав международной системы мониторинга СТБТ. Базы регистрации станции между 3-мя датчиками не превышают 3 км. Совместная обработка данных от разнесенных и синхронизированных станций позволила оценить направление на источник, его координаты и кажущуюся скорость сигнала.

Расчет пеленгов на источник сигналов проводился с применением алгоритма РМСС (прогрессивной множественной кросс-корреляции), используемой в международной системе мониторинга СТБТ [Cansi, 1995; Рыбнов и др., 2005]. На рис. 9 приведен график кросс-корреляции сигналов в ИДГ РАН – ГФО «Михнево» – НПО «Тайфун» (г. Обнинск). По рассчитанным временам задержки прихода сигнала был оценен пеленг на источник равный  $84 \pm 0,5^\circ$ . Средняя на траектории скорость при этом была равна  $230 \text{ м/с} \pm 12 \text{ м/с}$ . Для станции IS31 пеленг на источник равен  $28 \pm 0,5^\circ$ , а скорость распространения  $338 \text{ м/с} \pm 13 \text{ м/с}$ .

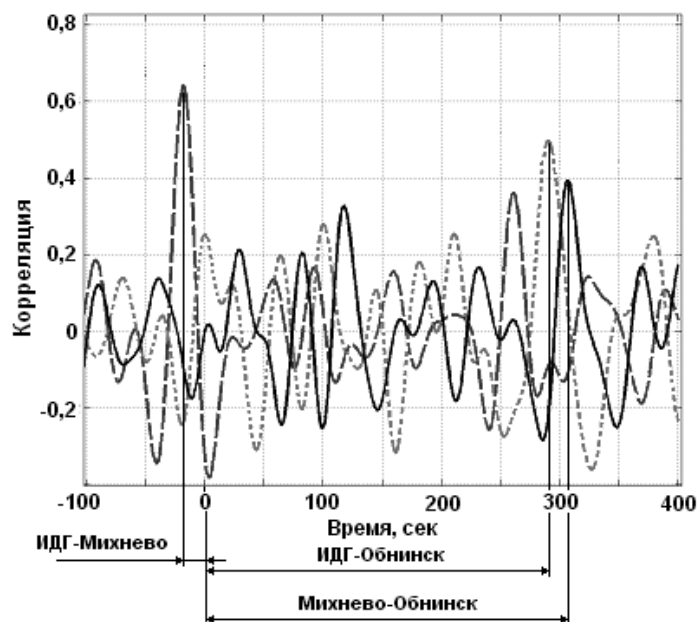


Рис. 9. График временных задержек прихода сигнала: ИДГ-Михнево – пунктир; ИДГ-Обнинск – точечная кривая; Михнево-Обнинск – сплошная кривая

Пересечение пеленгов (см. рис. 10) позволило оценить область максимального энерговыделения при разрушении болида. Размер области не превышает  $9 \times 18 \text{ км}$ , а её центр хорошо совпадает с траекторией пролета болида.

При расчете пеленгов в алгоритме РМСС сделано допущение – скорость ветра принималась равной нулю. Наличие бокового ветра вносит погрешность в определение пеленга, так как вызывает смещение траектории пропорциональное средней

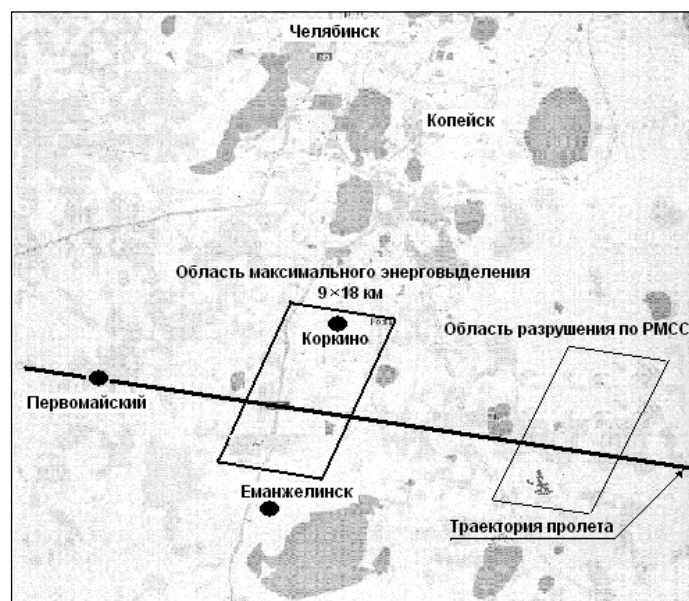


Рис. 10. Траектория пролета болида и местоположение его разрушения

скорости ветра по трассе, времени распространения сигнала и углу между направлением ветра и трассой распространения

$$\varphi = \alpha_{\text{расч}} \pm \beta,$$

где  $\alpha_{\text{расч}}$  – пеленг, рассчитанный по РМСС,  $\beta = \arctg \left( \frac{V_{\text{ветр}} \cdot \sin \gamma \cdot \Delta t}{L} \right)$  – угол смещения траектории,  $V_{\text{ветр}}$  – средняя скорость ветра по трассе,  $\gamma$  – угол между направлением ветра и пеленгом на источник,  $\Delta t$  – время распространения сигнала по трассе,  $L$  – расстояние от пункта регистрации до источника. Если ветер западный, то  $\langle - \rangle$ , для восточного  $\langle + \rangle$ .

Расчеты показывают, что основную погрешность вносит ветер, перпендикулярный трассе распространения IS31-источник. Тогда угол смещения траектории  $\beta \approx 4^\circ$ , а область местоположения источника сместится западнее на  $\approx 36$  км (см. рис. 10).

Полученная оценка местоположения разрушения болида хорошо совпадает с данными по его пролету и разрушению, приведенными в [Borovička et al., 2013], где оценка траектории была проведена на основе анализа целого ряда видеозаписей пролета болида, полученных с разных точек. Вычисление траектории по базисным наблюдениям традиционно используется при определении траекторий и орбит болидов.

## Заключение

Челябинское событие – первый крупный космический объект, чей вход в атмосферу детально задокументирован. В статье по данным регистрации инфразвуковых сигналов на расстояниях, превышающих 500 км, определено местоположение области основного энерговыделения при пролете и фрагментации Челябинского ме-

теороида между пунктами Коркино-Еманжелинск-Первомайский, которое хорошо согласуется как с данными, полученными при анализе видеозаписей [Borovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013], так и спутниковых снимков [Miller et al., 2013].

По результатам натурных наблюдений 7-ми инфразвуковыми станциями оценена энергия Челябинского болида с использованием двух методик, в основу которых заложен частотный принцип. Соответствующая энергия метеороида составляет  $445 \pm 142$  кТ и  $415 \pm 97$  кТ, что также неплохо согласуется и с другими оценками энергии 380 кТ ÷ 517 кТ [Емельяненко и др., 2013; Попова и др., 2013] и позволяет утверждать, что инфразвуковые измерения можно использовать для оценки энергии метеороидов с достаточной для практических целей точностью. Учет влияния высоты источника на оценку его энергии требует дальнейших исследований. Можно ожидать увеличение оценки энерговыделения в зависимости от высоты в 1,1–1,7 раза.

### Литература

- Губкин К.Е. О подобии взрыва // ФАО АН СССР, № 10, 1978. с. 49–60.
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.
- Немчинов И.В., Адушкин В.В. и др. Катастрофические воздействия космических тел / М.: ИЦК «Академкнига», 2005. с. 310.
- Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С. и др. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных / Сб. научных трудов ИДГ РАН, 2013 (статья в этом же сборнике).
- Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Евменов В.Ф. Инфразвуковая система регистрации акустико-гравитационных волн // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2005. с. 29–33.
- Хргиан А.Х. Физика атмосферы // М.: Изд-во МГУ, 1986. с. 328.
- Цикулин М.А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел // М.: Наука, 1969. 86 с.
- Borovička J., Spurný P., Shrbený L., Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide CBET 3423, D.W.E. Green, ed., Central Bureau for Astronomical Telegrams, International Astronomical Union, p. 1–1, 2013.
- Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 1021–1024.
- Edwards, W.N., Brown, P.G., ReVelle, D.O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. P. 1136–1160.
- Edwards, W.N. Meteor generated infrasound: theory and observation // In: Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.), Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. 2010. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 361–414.
- Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A. Infrasound production by bolides: A global statistical study // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 80. P. 208–229.
- Miller S.D., Straka W.C., Bachmeier A.S., Schmit T.J., Partain P.T., Noh Y.-J. Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event // Submitted to PNAS, April 2013.
- ReVelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // In: Remo JL (ed.) Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects – the United Nations international conference. New York Academy of Sciences. 1997. V. 822. P. 284–302.

*Silber E., ReVelle D.O., Brown P., Edwards W.* An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements // JGR. 2009. V. 114, E08006.

*Stevens, J.L., Adams, D.A., Baker, G.E., Xu, H., Murphy, J.R., Divnov, I., Bouchik, V.N.* Infrasound Modeling Using Soviet Explosion Data and Instrument Design Criteria from Experiments and Simulations // Technical Report ADA446517S. 2006.