

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА ПРИ ВЗРЫВЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

***В.А. Харламов¹, О.П. Попова¹, Ю.С. Рыбнов¹,
Е.В. Подобная¹, П. Дженискенс²***

¹ – Институт динамики геосфер РАН; ² – SETI Institute

Приведена методика расчета пространственных координат и результаты вычислений пеленгов и координат источника излучения звукового сигнала и их ошибок при взрыве челябинского метеорита по данным регистрации акустических сигналов в различных пунктах.

Введение

Сигналы от пролета и взрыва челябинского метеорита были зарегистрированы различными датчиками во многих пунктах. В частности были сделаны записи акустических сигналов сейсмическими датчиками в карьере Коркино, а в ряде точек в Челябинске и окрестностях зафиксированы моменты времени вступлений звуковых сигналов в эти пункты. Координаты всех точек регистрации определены с высокой точностью. Совместная обработка набора некоторых записей позволила оценить пеленги и координаты места источника сигнала.

Регистрация в Челябинске

Приход звуковых сигналов от пролета метеорита зафиксирован рядом пунктов в г. Челябинске. Точки регистрации сигналов, их координаты и времена регистрации приведены в таблице S12 из [Porova et al., 2013]. На основании этих данных можно рассчитать как минимум пеленги на источник сигнала. Такие расчеты для некоторых комбинаций точек регистрации проведены с использованием метода PMCC (Progressive Multichannel Cross-Correlation method) [Cansi, 1995]. Результаты расчетов приведены в таблице 1. Точки регистрации – это номера наблюдений в таблице S12; базы – расстояния между точками наблюдений, РВП – разность времен прихода, пеленг – направление на источник, скорость следа – скорость распространения сигнала вдоль поверхности земли, угол места – направление на источник от горизонтальной плоскости.

Таблица 1

**Базы регистрации и измеренные пеленги и скорости
на источник сигнала от взрыва метеорита**

Точки регистрации	Базы, км	РВП, с	Пеленг, гр.	Скорость следа, м/с	Угол места, гр.
417, 35, 216	9.5, 3.5, 7.7	24.4, 2.9, -21.5	191±5	357 ±5%	50
30 а, 160, 30	6.4, 4.1, 6.3	-1.1, -10, -8.9	194±3	416 ±8%	54
30 а, 160, 90	6.4, 4.4, 10.0	-1.1, -10.3, -9.2	195±2	297 ±10%	44
258, 60, 329	2.2, 3.0, 3.98	5.3, 1.5, -3.8	207±5	376 ±7%	51
31, 60, 329	3.2, 5.2, 4.0	9.1, 5.3, -3.8	204±3	323 ±5%	47
30а, 30, 90	6.3, 8.2, 4.4	10, 0.3, 10.3	201±3	350 ±5%	49
177, 237, 452	4.97, 3.0, 7.8	0.7, 6.5, 5.75	198±12	406 ±21%	53

Погрешности расчетов определяются ошибками измерения РВП, скорости звука и размеров длин баз. При высокоточной привязке пунктов последней составляющей можно пренебречь. Ошибка в определении скорости звука так же невелика (~1%). Следует отметить, что здесь ошибки измерений РВП в пункты регистрации вызваны не столько ошибкой фиксации времени ($\pm 0,1$ с), сколько выбранными событиями (табл. S12 из [Porova et al., 2013]), по которым фиксировались моменты прихода сигнала. При расчетах погрешность измерения РВП принята равной $\pm 0,5$ с.

Видно, что пеленги на источник по выбранным комбинациям точек регистрации близки и, учитывая погрешности расчетов, лежат в диапазоне $199 \pm 5^\circ$. Значения пеленгов, оцененные как кратчайшее расстояние до траектории пролета метеороида, составляют $198\text{--}204^\circ$, что оказывается в том же диапазоне.

Регистрация в карьере Коркино

На угольном карьере в г. Коркино размещены сейсмические датчики для регистрации событий в карьере (9 разнесенных в пространстве датчиков) [Усольцева и др., 2014]. 6 сейсмических датчиков зарегистрировали акустические сигналы от

Челябинского события 15.02.2013. Сигналы, записанные некоторыми датчиками, показаны на рис. 1. Координаты датчиков приведены в таблице 2. Для измерения координат источника по этим сигналам нужно не менее трех датчиков, образующих измерительный комплекс. На рисунке 2 показано расположение в пространстве датчиков К2, К4 и К8, образующих одну из измерительных систем. По координатам датчиков (табл. 2) рассчитываются размеры и ориентация баз в выбранной системе координат. Следовательно, база в данном случае вектор, имеющий 3 координаты. Необходимо также измерить РВП по сигналам рис. 1 в точках расположения эти датчиков.

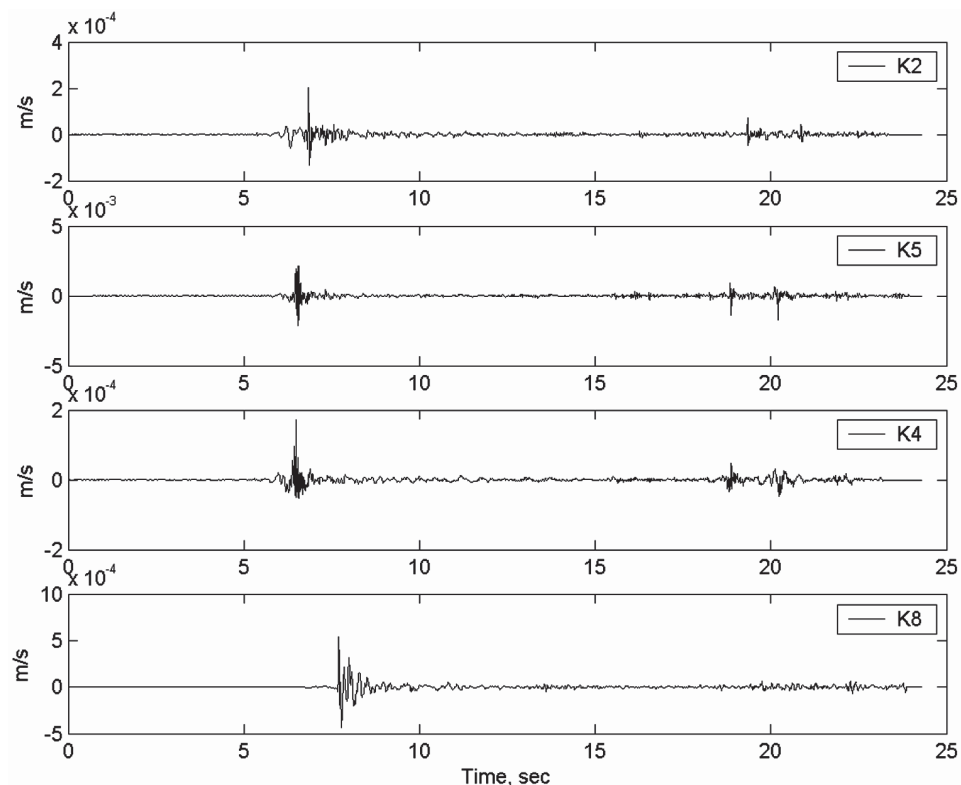


Рис. 1. Сигналы от взрыва Челябинского болида, зарегистрированные датчиками, установленными в карьере Коркино

Таблица 2

Координаты датчиков

Номер датчика	Широта°, с	Долгота°, в	Высота, м
K2	54.907614	61.412222	-51.879
K3	54.900001944	61.407267	234.930
K4	54.904536	61.417533	79.48
K5	54.904914	61.415767	59.40
K8	54.907619	61.4396	160.578

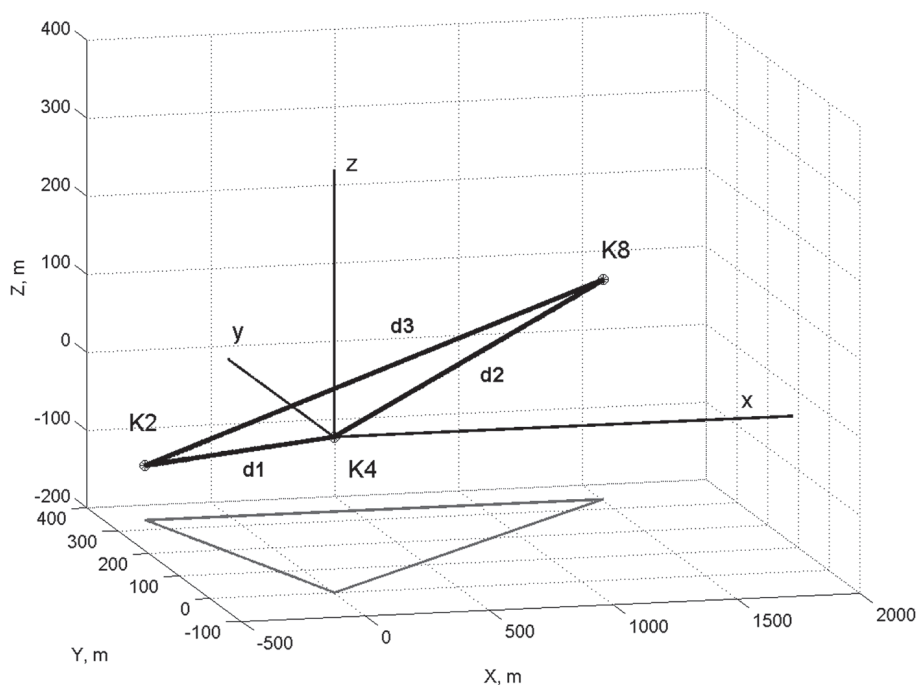


Рис. 2. Схема размещения в карьере трех датчиков K2, K4 и K8, образующих измерительную группу, и проекция группы на горизонтальную поверхность. База $d1 = 499$ м отклонена от оси x на угол $\varphi_1 = 135,2^\circ$ и наклонена к оси z на угол $\theta_1 = 95^\circ$; соответственно база $d2 = 1549$ м, $\varphi_2 = 12,8^\circ$, $\theta_2 = 87^\circ$; база $d3 = 1859$ м, $\varphi_3 = 0^\circ$, $\theta_3 = 83,5^\circ$

Характеристики баз и измеренные для каждой базы РВП приведены в таблице 3. $d1-d6$ – название базы, соединяющей датчики, приведенные в соответствующей ячейке. Приведены также наклонная длина базы, высота (вертикальный размер), угол поворота φ от направления на восток, угол отклонения от горизонтали θ .

Совокупность этих данных позволяет определить пространственные координаты расположения источника акустического сигнала от взрыва метеорита. То, что сигналы, показанные на рис. 1, зарегистрированы сейсмическими датчиками от акустического источника свидетельствуют их времена прихода в пункты регистрации (табл. 3), соответствующие скорости звука $c = 300$ м/с.

Таблица 3

Характеристики измерительных баз

База	Длина, м	Высота, м	Поворот φ°	Наклон θ°	dt, сек
$d1-K4-K2$	499.3	131.4	135.4	15.2	-0.368
$d2-K4-K8$	1549.3	81.1	12.8	3.0	1.222
$d3-K2-K8$	1859.0	212.5	0	6.5	0.854
$d4-K3-K2$	945.2	285.8	69.3	17.5	1.56
$d5-K3-K8$	2325.4	73.3	21.3	1.8	2.42

Методика измерения координат источника сигнала

Следует сразу оговориться, что расчеты проводятся в предположении точечного источника. По результатам измерений РВП dt для каждой базы вычисляется параметр поверхности положения источника $dr = dt \cdot c$ (разность расстояний от источника до образующих базу приемников, c – скорость звука), которая представляет собой гиперboloид вращения около направления базы. Задача определения места или направления на источник сводится к расчету поверхностей положения (гиперboloидов) для всех баз и отысканию их линий и точек пересечения. Такая задача решена в [Харламов, 2003].

Необходимы три базы (например, $d1$, $d2$ и $d3$) для определения трех координат источника акустического сигнала, находящегося в произвольной точке М пространства (рис. 2). Разности расстояний от точки М до соответствующей пары приемников К4-К2, К4-К8 и К2-К8 определяют 3 гиперboloида вращения вокруг соответствующей базы.

Проведены расчеты в системе координат с центром, совмещенным с точкой приемника К4, ось z вертикальна, а ось x направлена на восток и ось y направлена на север. При этом базы $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ и $d5$, являющиеся осями вращения гиперboloидов, не совпадают ни с одной из координатных осей. Поэтому для записи уравнения конкретного гиперboloида в канонической форме следует выбрать другую систему координат, в которой ось x' повернута на угол φ_i и ось z' наклонена на угол θ_i относительно соответствующих осей исходной системы координат.

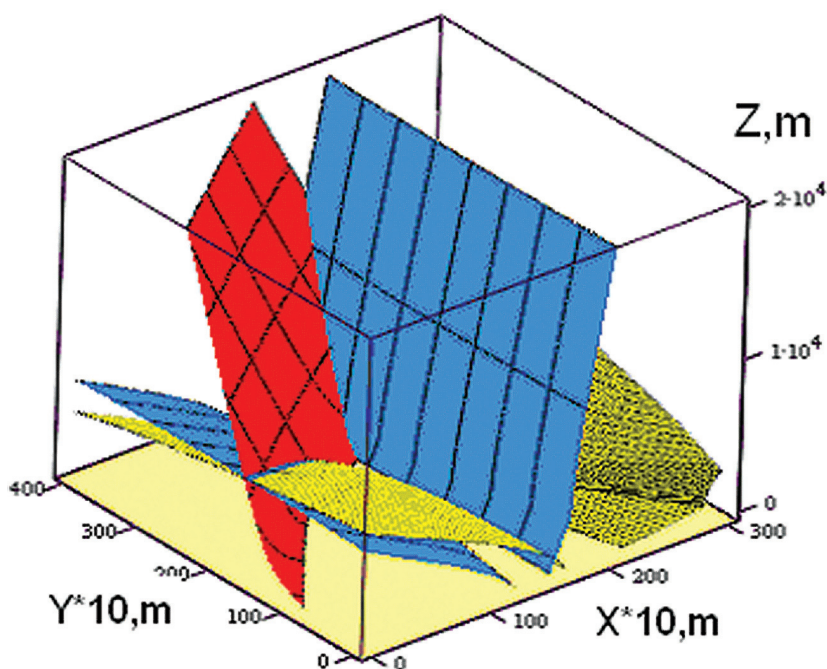


Рис. 3. Фрагменты гиперboloидов, построенных по трем базам $d1$ (К4-К2), $d2$ (К4-К8) и $d3$ (К2-К8) и их линии пересечения, которые практически слились в одну, изображенную на рис. 4.

В повернутой системе координат в качестве оси вращения гиперboloида выберем ось x' .

Пример пересечения трех гиперboloидов в пространстве показан на рис. 3. Пересечение каждой пары линий положения дает точку.

Результаты расчетов

По приведенной методике с использованием данных таблицы 3 проведены расчеты для трех сочетаний пар баз. В качестве примера на рис. 4 показаны построенная линия пересечения гиперboloидов по базам (K4-K2) и (K4-K8) и на ней отмечена точка источника сигнала. Место источника сигнала находится как точка пересечения линии пересечения гиперboloидов с конусом, построенным из начала координат под углом ε (угол места источника). Отыскание точки пересечения показано на рис. 5. Диапазон углов места $\varepsilon = 73\text{--}75^\circ$ источника найден из данных регистрации пролета метеорита, показанных на Fig. S26 из [Popova et al., 2013].

Результаты вычислений приведены в таблице 4. Оценим точность полученных результатов. Расчет ошибок по методике, изложенной в [Харламов, 2003], дает следующие результаты. Так, при величине ошибки измерения РВП $\sigma_{\text{дт}} = 0,01\text{с}$

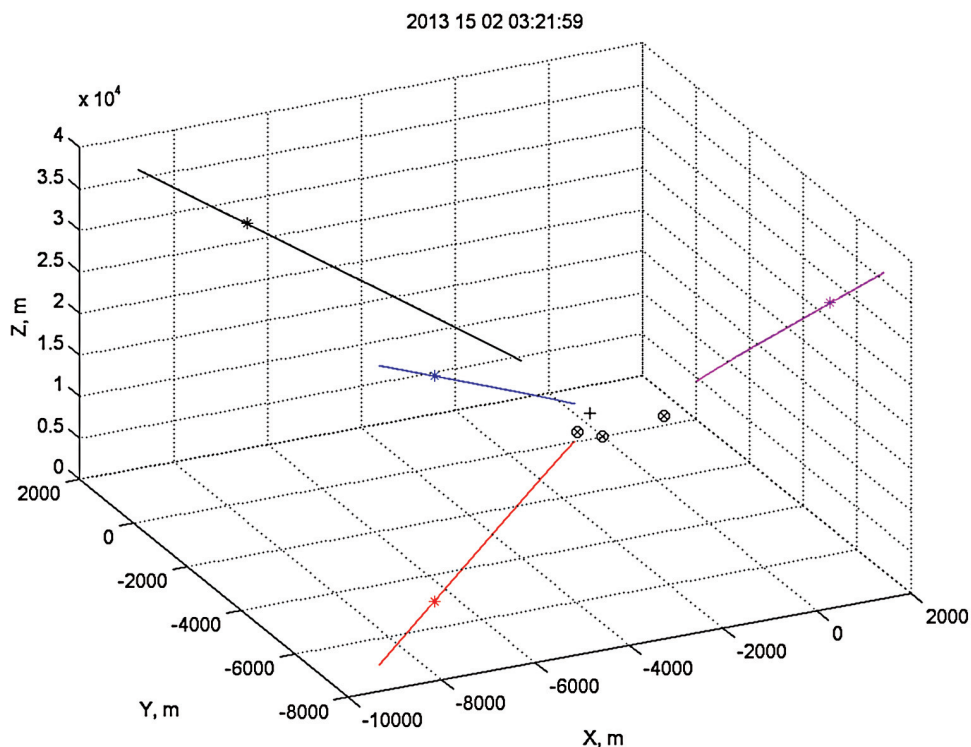


Рис. 4. Линия положения источника сигнала в пространстве и ее проекции на координатные плоскости; ☼ – точка источника сигнала с координатами $X = -6300$ м, $Y = -4500$ м, $Z = 26600$ м и $\alpha = 235^\circ$

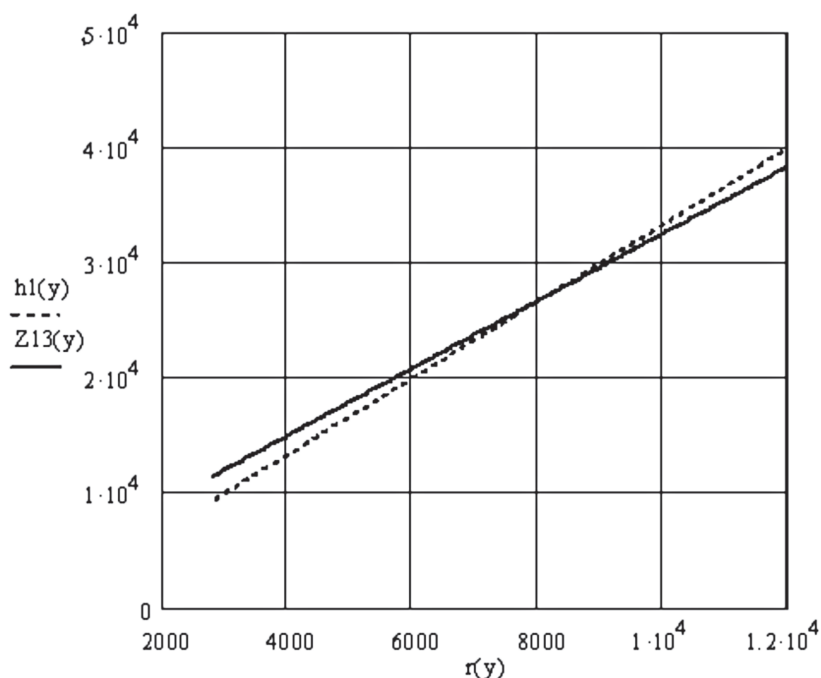


Рис. 5. Проекция линии положения источника сигнала (сплошная линия) и конуса с углом $\varepsilon = 73,2^\circ$ (пунктирная линия) на плоскость rOh ; Точка пересечения линий дает координаты источника сигнала $r = 7500$ м, $h = 26\,500$ м

($\sigma_{\Delta r} = 3$ м) получаем величины флуктуаций гиперболоидов $\sigma_h = 100\text{--}300$ м и величину ошибок линий положения 550 м, которая определяет точность измерения координат. При этом ошибка измерения высоты равна $\sigma_z = 700$ м, а ошибка измерения пеленга $\sigma_\alpha = 3^\circ$.

Таблица 4

**Рассчитанные координаты источника сигнала
от взрыва метеорита**

	Базы К2-К4-К8	Базы К2-К3-К8	Базы К2-К3-К4
Дальность, м	7500	6000	6700
Высота, м	27000	25500	26300
Азимут, °	232	240	243
Угол места, °	73.2	76.5	75.5

Рассчитанные пеленги от точек регистрации в Челябинске и от карьера в Коркино нанесены на карту рис. 6. С учетом погрешностей измерений пеленгов нанесен район возможных ошибок определения точки источника.

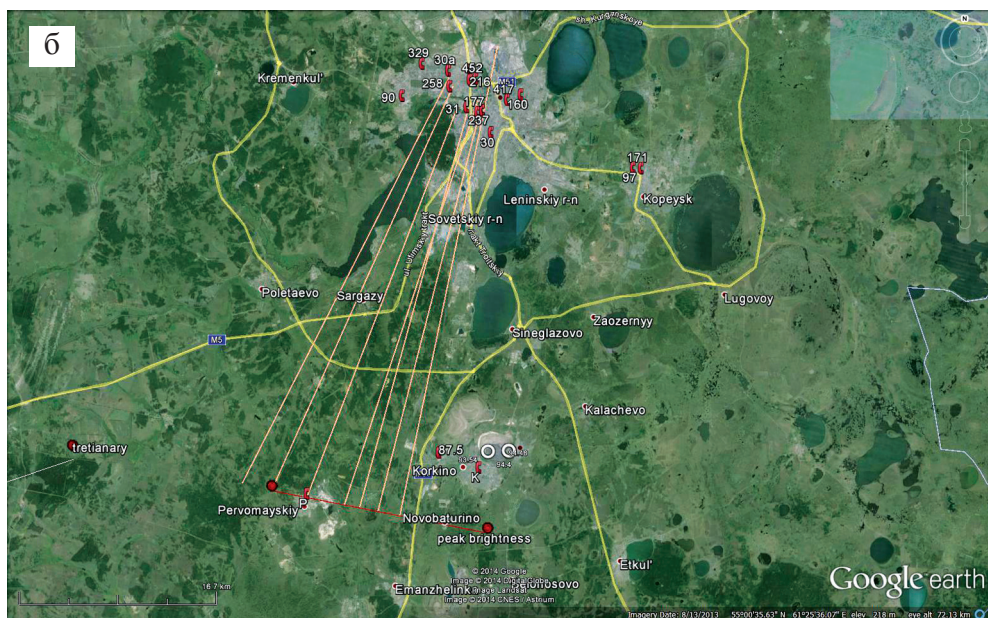
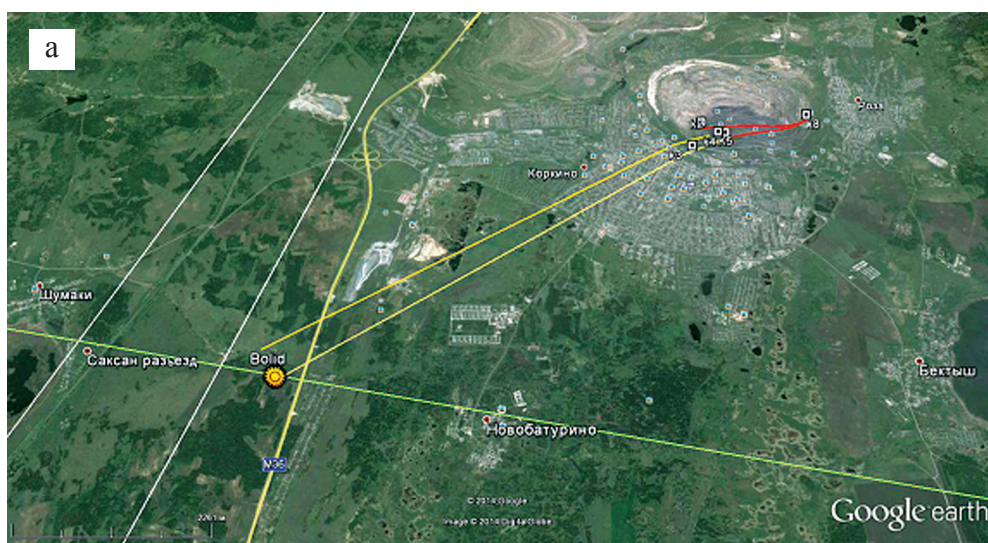


Рис. 6. Карта района расположения рудника в Коркино, на которой проложены измеренные на источник сигналов пеленги от карьера Коркино (а) (от измерительных групп К4-К2-К8 и К3-К2-К8) и пеленги от пунктов регистрации в Челябинске (б). Нанесена также траектория пролета болида [Popova et al., 2013]

Следовательно, по результатам расчетов координаты источника составляют высота ≈ 26 км с погрешностью $\sigma_z = 700$ м, дальность 7–8 км и пеленг $235\text{--}240^\circ$ с ошибкой $\sigma_a = 3^\circ$. Таким образом, средние географические координаты источника акустического сигнала от разрушения метеорита (при измерении на Коркинском карьере) составляют $54,86^\circ$ с.ш. и $61,31^\circ$ в.д. Кратчайшее расстояние до траектории соответствует пеленгу $238\text{--}243^\circ$.

Литература

Усольцева О.А., Дягилев Р.А., Мулев С.Н. Сейсмические колебания, вызванные ударной волной от Челябинского болида в ближней зоне. (Настоящий сборник).

Харламов В.А. Измерение координат источников инфразвука в трехмерном пространстве // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Книга 2: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: 2003. С. 386–396.

Canci Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method // *Geophys. Res. Lett.*, 22, p. 1021–1024, doi:10.1029/95GL00468, 1995.

Г. Корн и Т. Корн. Справочник по математике. М.: Наука, 1977, 832 с.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. V. 342. P. 1069–1073.