

Вычислительно-аналитический комплекс для прогнозирования столкновений астероидов и комет с Землей и построения сценариев вызванных ими катастроф

Д.Е. Вавилов, В.А. Дерюгин, Н.Б. Железнов,
А.В. Зайцев, О.М. Кочетова, Ю.А. Чернетенко, В. А. Шор

Всероссийская астрометрическая конференция,
Пулково, 21-25 сентября 2015 г.

С целью заблаговременной подготовки к активному или пассивному противодействию угрозе столкновения небесных тел с Землей создан программный комплекс, обрабатывающий поступающую по каналам связи информацию об открытии новых тел и их наблюдениях.

Работа комплекса в первую очередь ориентирована на получение информации из Центра малых планет. Комплекс каждые три минуты проверяет информацию на сайте Центра и в случае ее обновления считывает данные о появлении нового опасного объекта и/или его наблюдения.

Содержание информации распознается по ключевым словам. База данных наблюдений пополняется новыми данными. Вычисляется орбита тела по совокупности имеющихся наблюдений. Вычисляется матрица ковариации вектора координат и скоростей и оценки ошибок компонент в начальную эпоху.

На основе фотометрических данных подсчитываются диаметр и масса тела, причем для вновь открытых тел принимается значение альбедо, равное 0.14, и плотность 2.5 г/см³

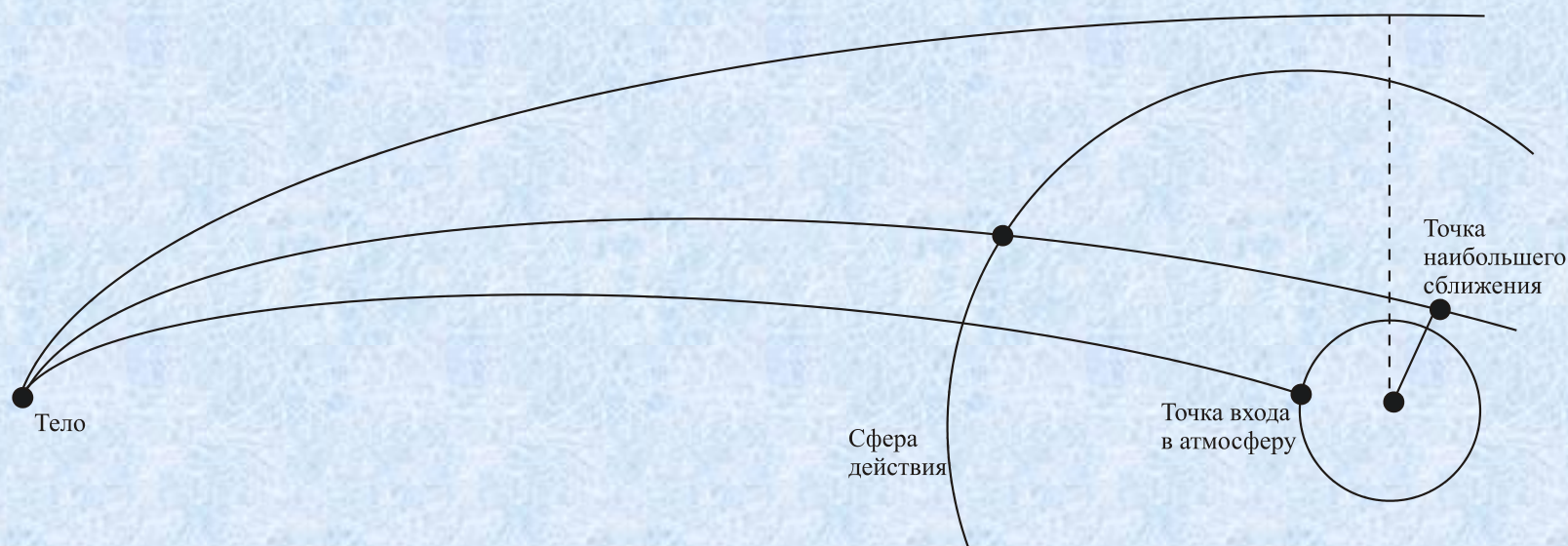
Возможные траектории тела относительно Земли

Прогноз движения выполняется численным интегрированием уравнений движения с учетом всех ощутимых возмущений.

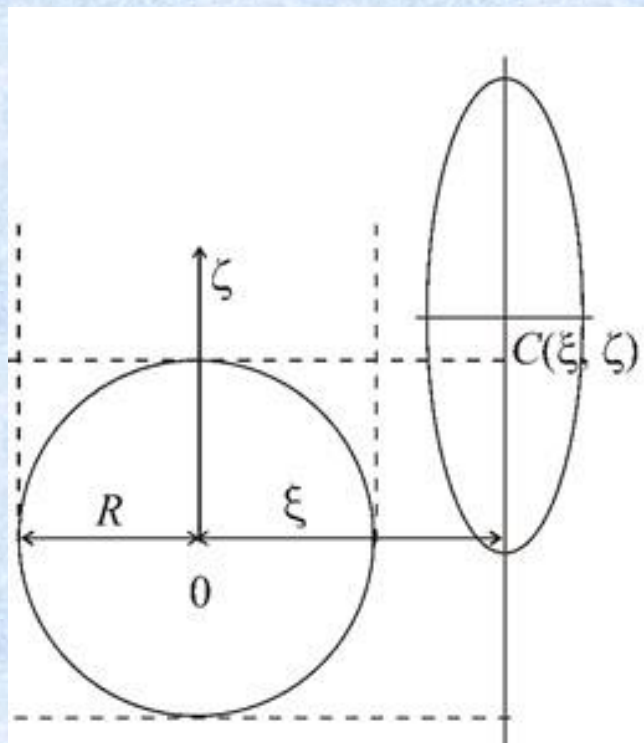
В ходе прогноза необходимо получать координаты тела в трех точках во время очередного сближения:

1. вход в сферу действия.
2. вход в атмосферу Земли.
3. прохождение на минимальном расстоянии.
Поиск нужных моментов осуществляется дроблением интервала прогноза по мере сближения.

Возможные траектории относительно Земли и точки, где вычисляются вероятности столкновения



Образ Земли и эллипс рассеяния траекторий на плоскости цели

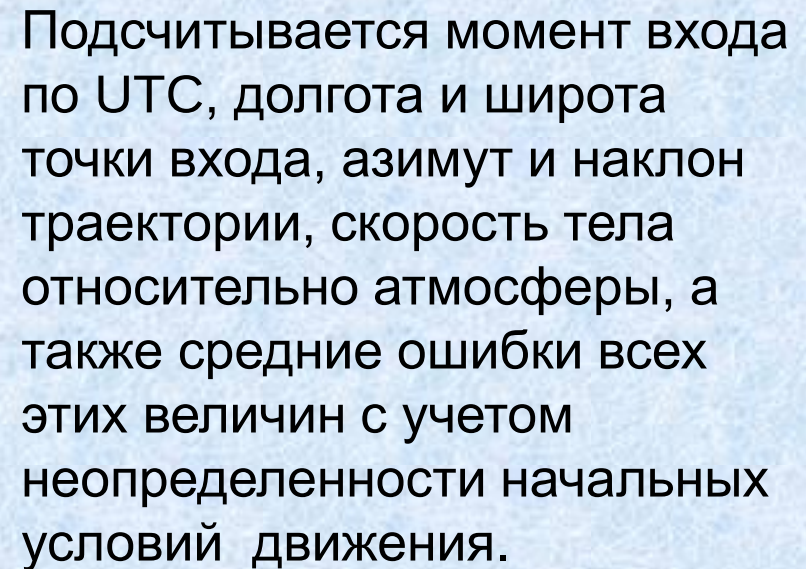


большая и малая полуоси эллипса рассеяния, равны средним ошибкам координат ζ и ξ как функций координат и скоростей тела в начальную эпоху и их средних ошибок.

Столкновение тела на номинальной орбите с Землей

В точке входа на высоте 100 км над уровнем земного сфероида вычисляются:

1. параметры гелиоцентрической орбиты и их ошибки;
2. вероятность столкновения;
3. осуществляется переход от системы координат J2000 к системе подвижного экватора и точки Весны;
4. осуществляется поворот системы таким образом, чтобы одна ось оказалась направленной в точку входа, а две другие соответственно по параллели и меридиану.



Движение тела в атмосфере

Движение тела в атмосфере порождает ударные волны, способные вызывать разрушения. Движение сопровождается нагревом воздушной массы и поверхности тела, испарением вещества. По мере усиления воздушного напора происходит уплотнение тела, развивается структурная неопределенность и в конечном счете фрагментация. Выделение энергии происходит на значительном участке траектории. Достаточно полное описание этих процессов требует решения весьма трудоемкой гидродинамической задачи. В.В. Шуваловым было показано, что если ввести понятие точечного эквивалентного взрыва, приводящего примерно к тем же самым разрушениям на земле, то можно обойтись без решения гидродинамической задачи в каждом конкретном случае. Эквивалентный взрыв с энергией, равной начальной энергии тела, имеет место в точке, где начальная скорость тела уменьшается вдвое.

Моделирование движения тела в атмосфере

Неопределенность начальных условий и случайный характер происходящих процессов заставляют прибегнуть к моделированию движения в атмосфере методом Монте-Карло. Расчет высоты и координат эквивалентного взрыва и других необходимых величин повторяется для 1000 случайных реализаций, начальных условий движения и массы тела, после чего результаты осредняются, находятся полуоси эллипса рассеяния точек на высоте эквивалентного взрыва и среднее значение его энергии. Аналогичные расчеты проводятся по достижению уровня поверхности. В ходе численного интегрирования моделируется уплотнение тела и его фрагментация. Слежение осуществляется за наиболее крупным осколком.

Расчет разрушения зданий и возможного числа пострадавших

После того как найдены энергия и координаты эквивалентного взрыва, по известной формуле может быть вычислено избыточное давление за фронтом ударной волны в любой точке. Экспериментально установлено, что разрушение зданий под действием избыточного давления подчиняется нормальному закону с мат-ожиданием, соответствующим определенной степени разрушения, и некоторым средним отклонением от этой величины

Разрушение зданий под действием избыточного давления (в кПа)

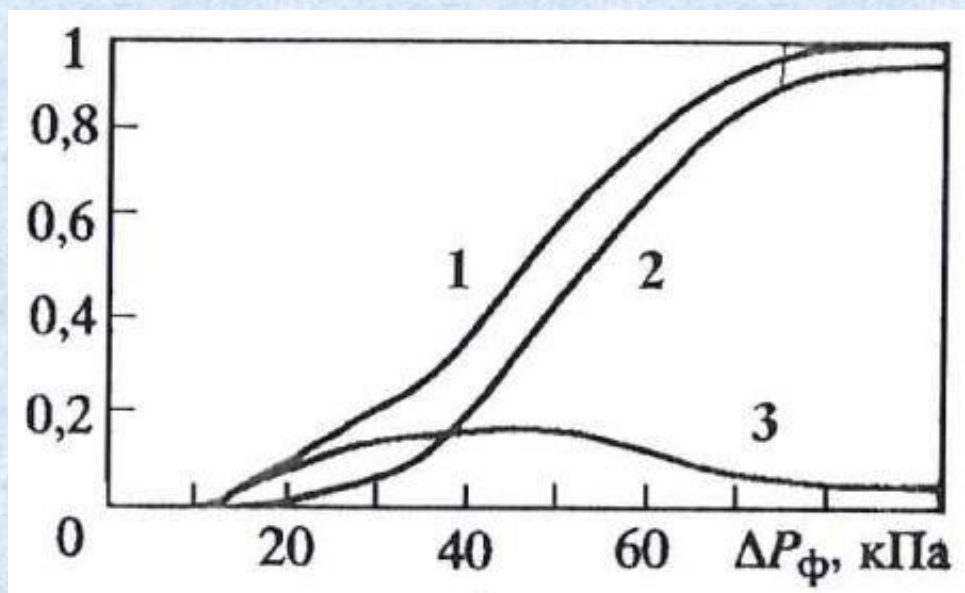
Характерные параметры нормальных законов – математические ожидания M интенсивности поражающих факторов, вызывающих не менее определенных степеней разрушения зданий, и средние квадратические отклонения σ – приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Математические ожидания M и средние квадратические отклонения σ избыточных давлений ударной волны (кПа), вызывающей разрушения зданий различной степени

Тип здания	слабая		средняя		сильная		полная	
	M	σ	M	σ	M	σ	M	σ
Со стенами типа «сэндвич»	20	4	40	8	60	12	90	16
Панельное	20	3,8	37,5	7,5	57,5	11,3	80	15
Кирпичное	14	2,3	22,5	5,5	42,5	7,8	60	11

Вероятность поражения людей в зданиях, разрушаемых под действием избыточного давления (кПа)



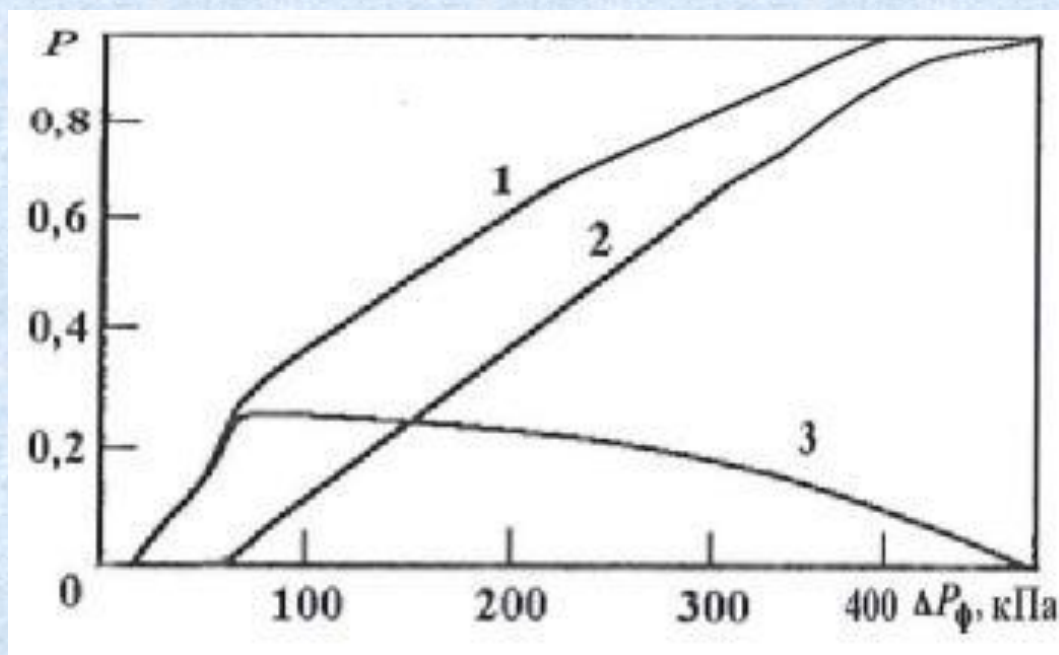
Кирпичные здания

1 - общие потери

2 - безвозвратные

3 - санитарные

Вероятность травмирования людей на открытой местности под действием избыточного давления (кПа)



- 1 - общие потери
- 2 - безвозвратные
- 3 - санитарные

На основе указанных законов с учетом количества зданий каждого типа и времени суток ведется подсчет санитарных и безвозвратных потерь в каждом населенном пункте, оказавшимся в зоне воздействия воздушного взрыва.

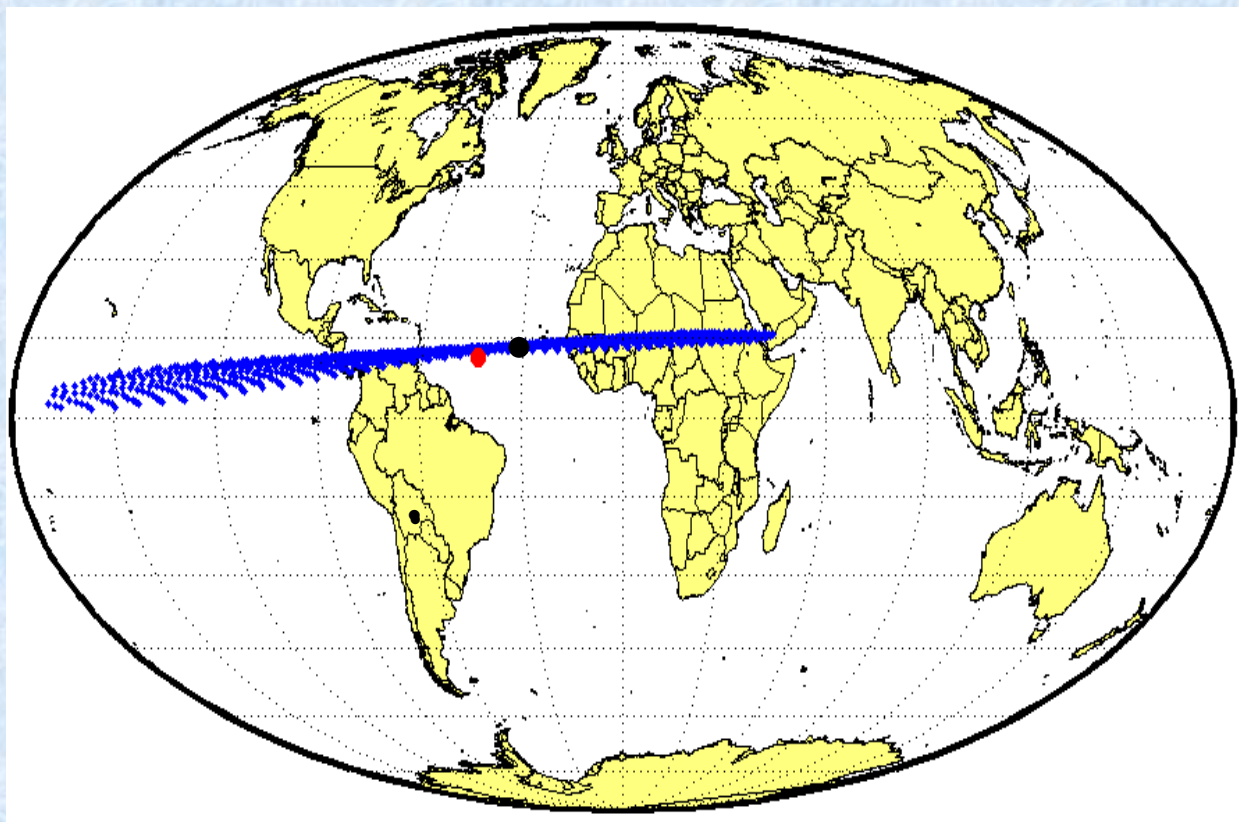
Расчет потерь при наземном ударе

Если высота эквивалентного взрыва оказывается отрицательной, это означает, что тело достигает поверхности без существенной потери энергии. До 80 % энергии при этом расходуется на образование сейсмических и воздушных ударных волн. Магнитуда колебаний на конкретной площадке рассчитывается в зависимости от энергии тела, расстояния до эпицентра, твердости подстилающих пород и сейсмических особенностей региона. Расчет разрушения зданий и потерь среди населения ведется в том же ключе, как и при воздушном взрыве. При расчетах используются данные Географической информационной системы.

Параметры орбиты 2008 TC3 при падении на Землю, найденные по первым 96 наблюдениям

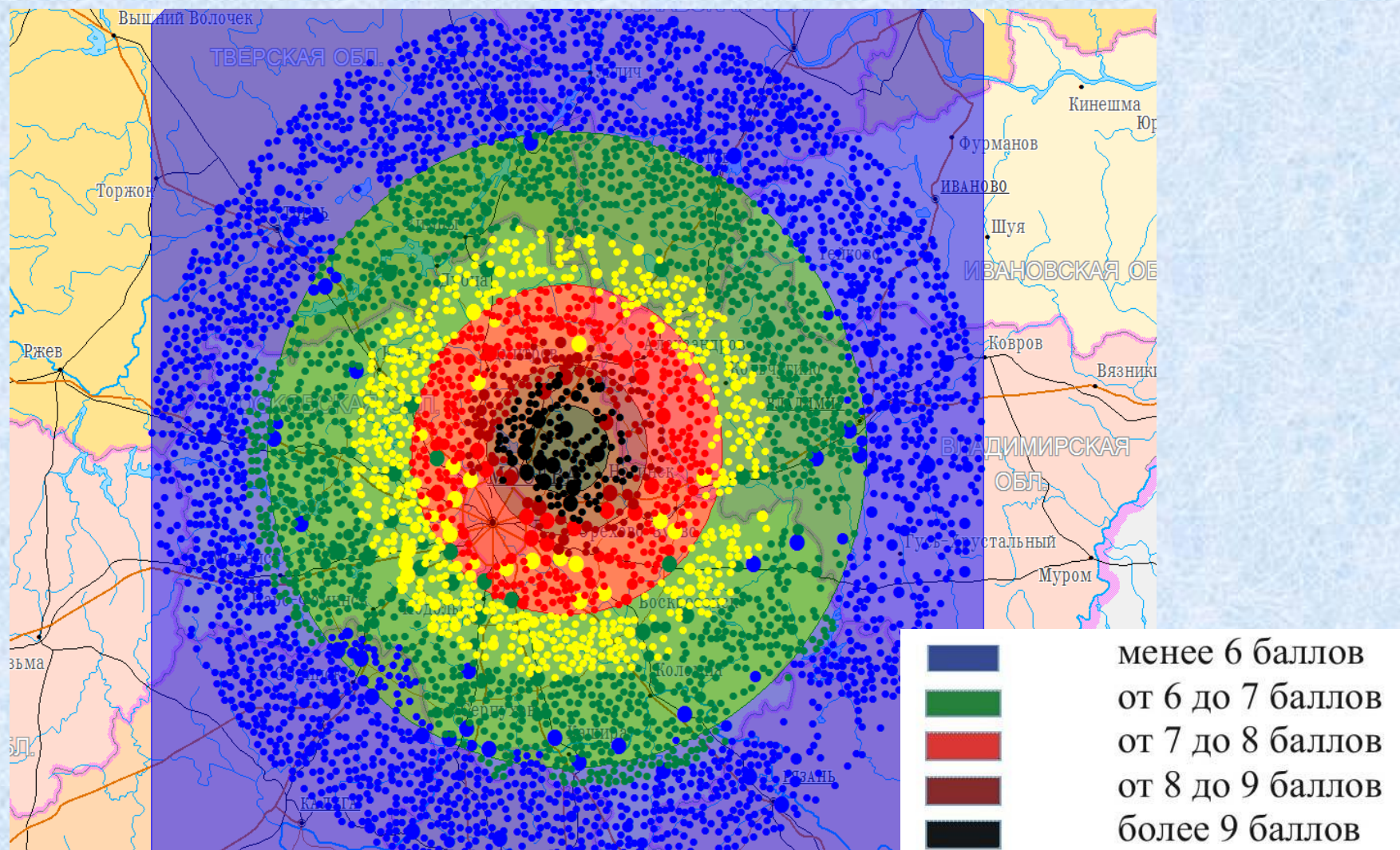
	Результаты работы комплекса	Результаты JPL
T	2454746.61598	
l	$32.98856^\circ \pm .127^\circ$	$31.4^\circ, 32.2^\circ$
φ	$20.45737^\circ \pm .162^\circ$	$20.9^\circ, 20.8^\circ$
Az	$101.63589^\circ \pm .040^\circ$	$101.^\circ$
θ	$-18.52167^\circ \pm .090^\circ$	$-19.^\circ$
V	$12.861 \text{ км/с} \pm .015 \text{ км/с}$	12.8 км/с

Падение метеороида 2014 АА

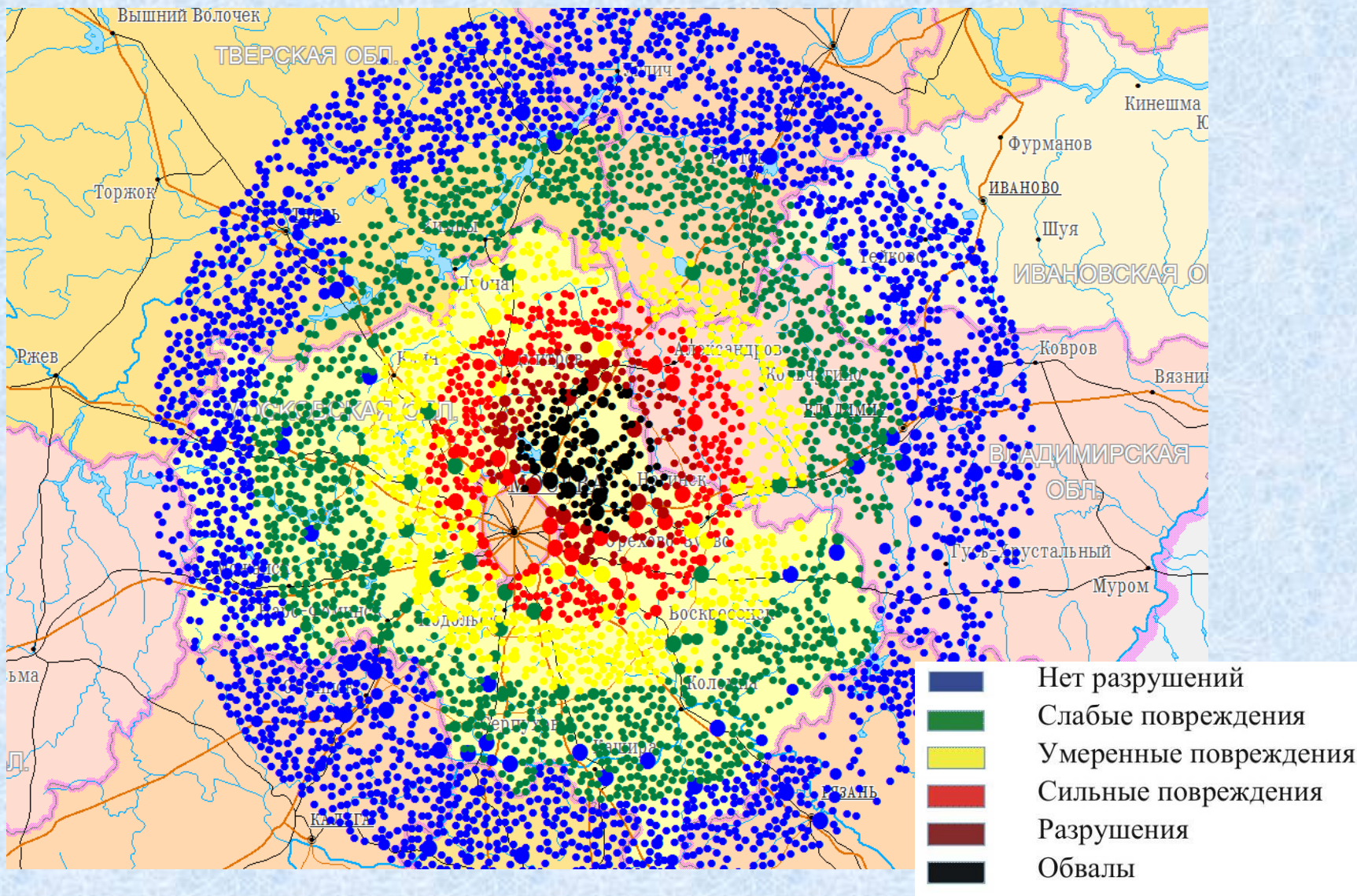


Синий трек – по данным ЛРД, красный кружок – по инфразвуковым данным (11.3° N, 43° W), черный – по вычислениям стенда (13.5° N, 31° W)

Сейсмическое поле при падении гипотетического астероида ($D=250$ м) в Подмоскowie



Возможный ущерб



Вычисления в режиме обучения и тренировки

В этом режиме обучающийся может задать время и место возможной катастрофы, параметры траектории падения (азимут, угол наклона к горизонту, топоцентрическую скорость), размер тела и время упреждения. В соответствии с этими данными будет найдена гелиоцентрическая орбита тела в момент за несколько суток или часов до падения (время упреждения). На основе фиктивных случайных наблюдений тела формируется матрица ковариации параметров орбиты.

Интегрирование вперед по времени на интервале упреждения приводит к проникновению тела в атмосферу Земли и к последующему воссозданию картины воздушного или наземного взрыва в соответствии с заданными обстоятельствами.

Заключение

Разработанный комплекс является действенным инструментом предупреждения о грозящей опасности и возможных потерях. Комплекс уже работает в течение года. Он продолжает совершенствоваться и развиваться. Подготовлена новая версия комплекса. Ежедневные результаты ее работы будут отражаться на сайте ИПА. На очереди версия, которая позволит использовать сообщения российских обсерваторий, еще до их публикации на сайте Центра малых планет (выигрыш времени). На очереди также задача автоматического извещения операторов и органов МЧС о возникновении угрожающей ситуации в космосе и обстоятельствах возможной катастрофы.

Благодарим за внимание!



Челябинский метеороид

- Начальные данные

(данные чешских астрономов, опубликованы на сайте [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение метеорита Челябинск](http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск))

- 2013 02 15 дата (год, месяц, число)
- 7ч 20м 22с. Московское время падения

$$L = +61^{\circ} 27' 18'' \quad \varphi = +54^{\circ} 50' 9.6''$$

- $Az = 279.5^{\circ} \quad \Theta = -16.5^{\circ}$
- $V = 18.3 \text{ км/с}; \quad D = 17. \text{ м}; \quad E = 300 \text{ килотонн}$
- 5 суток (время до столкновения)

Гелиоцентрическая орбита тела, найденная по входным данным

- $T=2456338.639866$
- $M = 12.16049^\circ$
- $Peri = 109.40676^\circ$
- $Node= 326.43288^\circ$
- $i = 10.43350^\circ$
- $e = 0.68340518$
- $n = 0.287336025^\circ/\text{сут}$

Вычисленные значения параметров на входе в атмосферу

$$T = 2456338.63970$$

$$L = 65.22682^{\circ} \pm 0.03028^{\circ}$$

$$\varphi = 54.41748^{\circ} \pm 0.08711^{\circ}$$

$$Az = 282.52862^{\circ} \pm 0.01039^{\circ}$$

$$\theta = -18.28365^{\circ} \pm 0.00734^{\circ}$$

$$V = 18.259 \text{ км/с} \pm 0.006 \text{ км/с}$$

Вычисленные значения параметров при падении на Землю

- $T = 2456338.63992$
- $L = 60.20123^\circ \pm 0.04689^\circ$
- $\varphi = 54.94841^\circ \pm 0.08813^\circ$
- $Az = 278.48965^\circ \pm 0.02839^\circ$
- $\theta = -15.91496^\circ \pm 0.00601^\circ$
- $V = 18.312 \text{ км/с} \pm 0.007 \text{ км/с}$