

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБЛАСТЯХ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

*профессор **К.В. Краснобаев**, заведующий кафедрой
аэромеханики и газовой динамики*

*доцент **Г.Ю. Котова***

Исследования с помощью космических аппаратов «Spitzer», «Herschel», «Planck»... выявили существование сотен горячих звезд, окруженных молодыми звездными объектами. Эти молодые объекты часто располагаются в уплотнениях, процессы возникновения и эволюции которых определяют темп звездообразования в Галактике.

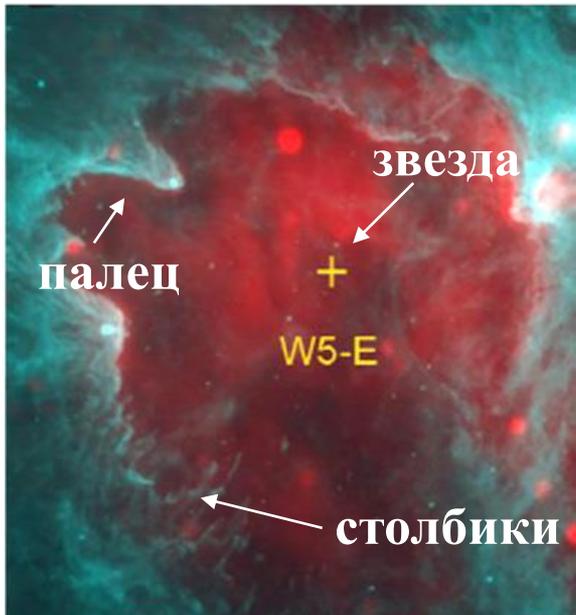
Примеры туманностей, на периферии которых наблюдаются
молодые звездные объекты (изображения слева направо):
туманности Единорог, Конская голова, RCW 49, Орион, Орел



Центральная звезда или группа звезд в туманности окружены горячим ионизованным водородом. Занимаемая ионизованным газом область называется областью НП. Характерная особенность внешних границ областей НП - их **нерегулярная структура**. Следствие: сжатие уплотнений и образование молодых звездных объектов

Наблюдения

На периферии областей III наблюдается большое разнообразие масштабов, форм и масс неоднородностей. Неоднородности имеют вид пальцев, столбиков, узелков



Пальцы и столбики
в W5-E



Туманность «Улитка»



Узелки в оболочке
«Улитки»

Задачи теории:

- разработать математические модели образования уплотнений;
- определить параметры сгустков;
- для конкретных объектов установить, могут ли неоднородности являться «питомником» молодых звездных объектов.

При построении моделей используются методы механики сплошной среды, кинетической теории газов, физики плазмы и теории излучения. Постановка и решение конкретных задач опираются на современные достижения теории дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, на широкое применение компьютерных программ и средств визуализации результатов расчетов.

Математическая модель расширения области III

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0,$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3p}{2\rho} \right) + \frac{p}{\rho} \operatorname{div} \vec{v} = \frac{1}{\rho} (\mathcal{G} - \Lambda),$$

$$\frac{ds}{dt} = (1-s) \int_{\nu_H}^{\infty} \int_{4\pi} \sigma_{H\nu} \frac{I_\nu}{h\nu} d\nu d\omega - \frac{s^2 \rho}{m_H} \alpha_H(T),$$

$$\frac{dI_\nu}{dx} = -\sigma_{H\nu} n_H I_\nu + \varepsilon_\nu.$$

\mathcal{G} – энергия, поглощаемая при нагреве, $\Lambda = \Lambda(\rho, s, T)$ – энергия, теряемая при охлаждении, $\alpha_H(T)$ – коэффициент фоторекомбинации, I_ν – интенсивность излучения

Модель среды: в одножидкостном приближении трехкомпонентная среда (протоны, нейтральные атомы водорода, электроны) с примесями тяжелых элементов

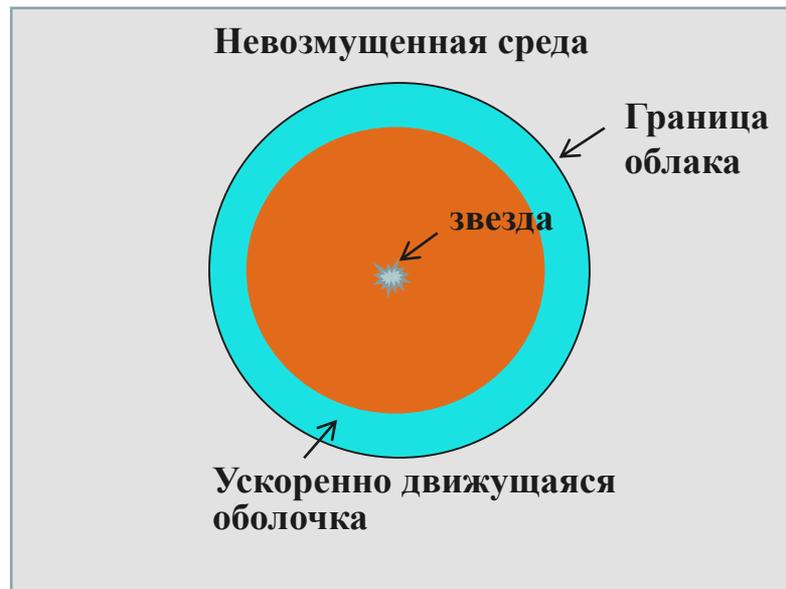
Основные процессы: ионизация, фоторекомбинация и радиационное охлаждение

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ: новая модель расширения области НП в неоднородной межзвездной среде Г.Ю. Котова, К.В. Краснобаев, Р.Р. Тагирова

Котова Г.Ю., Краснобаев К.В. (2010)

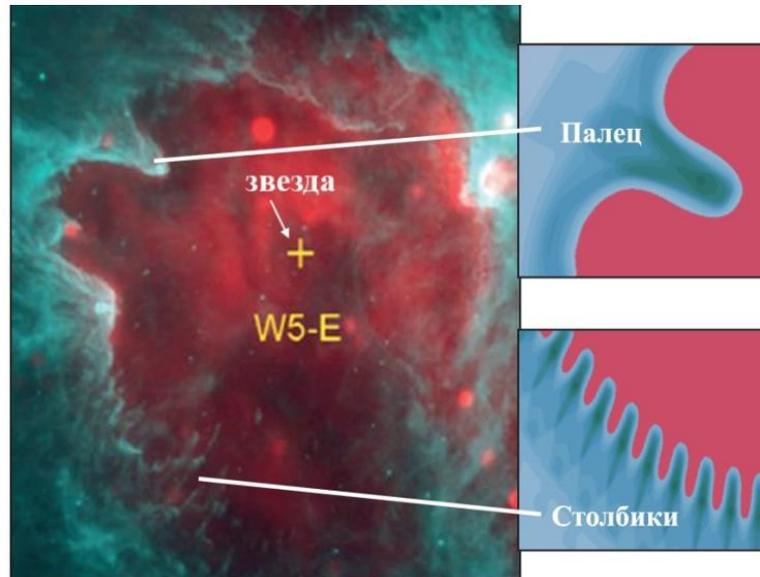
Особенность модели:

Звезда располагается **не в однородной среде**, а в облаке. Нагретый излучением звезды газ расширяется и ускоряет внешние слои облака. Под действием ускорения оболочка деформируется, в ней возникают неоднородности.



Результаты моделирования формирования пальцев и столбиков

Холодное вещество в виде пальцев и столбиков (бирюзовый цвет) содержит молодые звездные объекты и проникает внутрь «пузыря», заполненного нагретым излучением звезды газом (красный цвет).

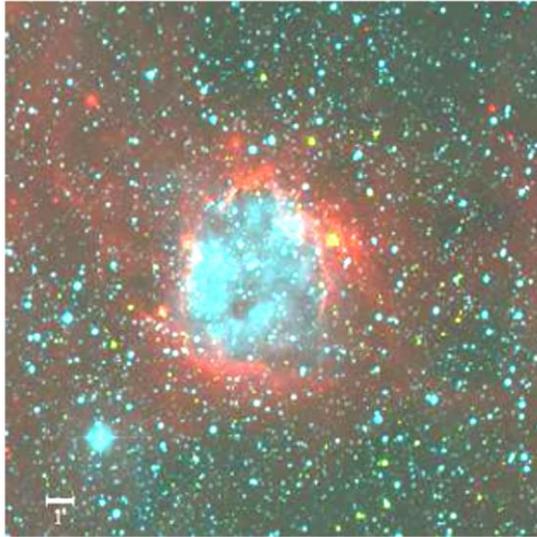


Данные космических
наблюдений области W5-E

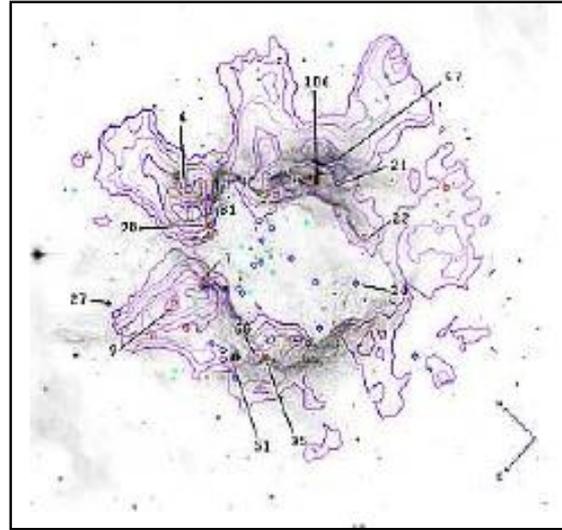
Численное
моделирование

Структура неоднородностей в области активного звездообразования НШ RCW 82

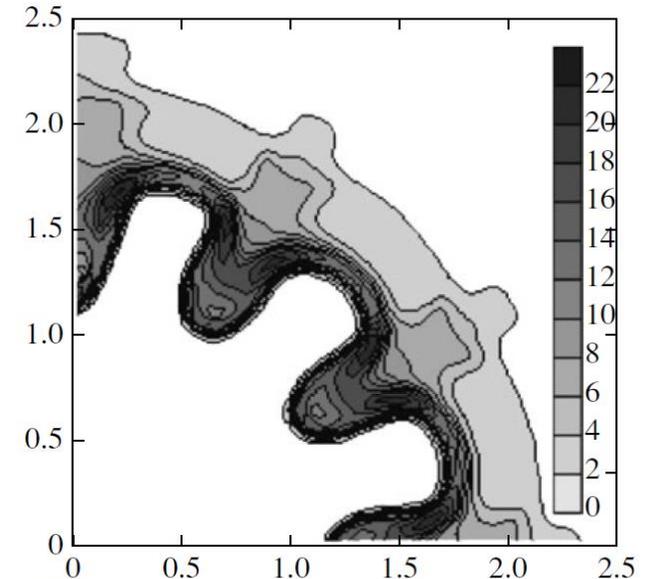
Краснобаев К.В., Котова Г.Ю., Тагирова Р.Р. (2015)



Изображение туманности
НШ RCW82



Контурны в эмиссии ^{13}CO



Расчет: изолинии плотности
в сферической оболочке
(масштаб произвольный)

Модель объясняет особенности формы наблюдаемых неоднородностей и распределение плотности в них. В согласии с наблюдениями, время формирования неоднородностей не превышает возраста туманности.

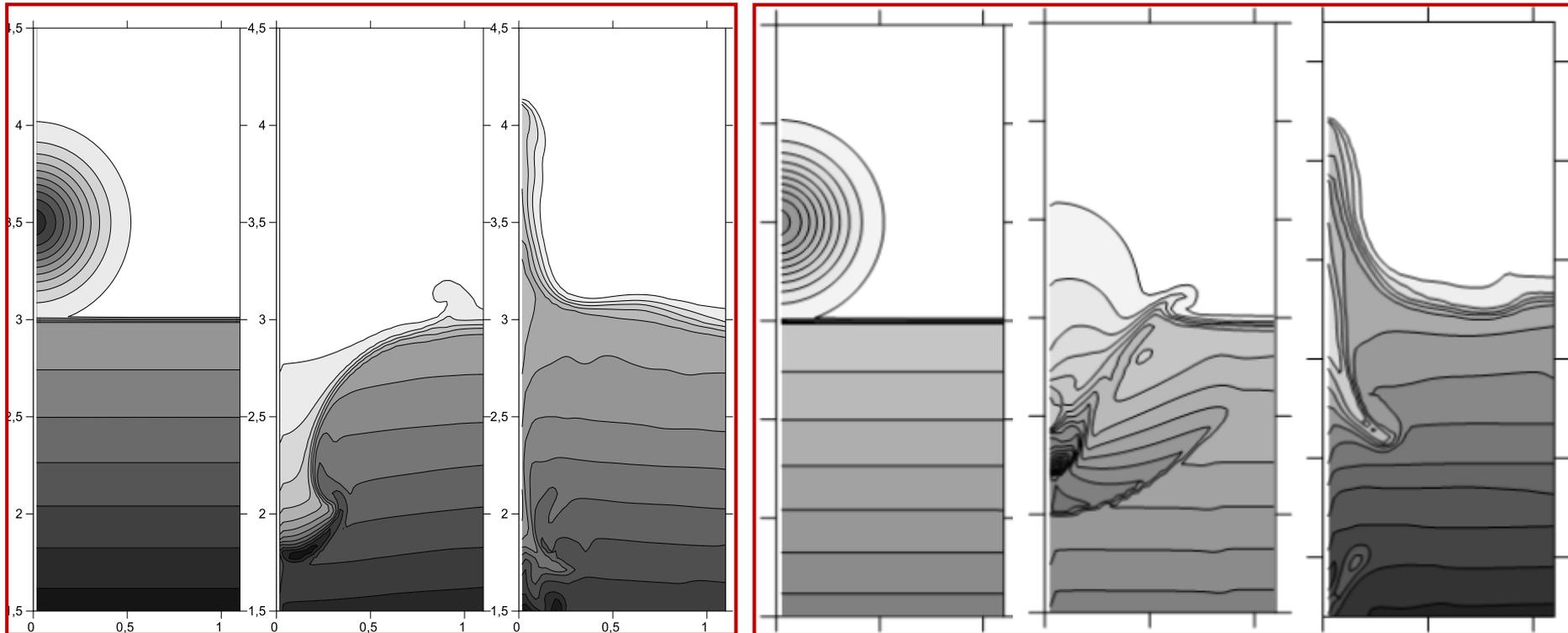
Кумулятивные струи, эффект «шампанского», автоволны

Компьютерное моделирование позволяет не только объяснять свойства наблюдаемых космических объектов и их движений, но и предсказывать новые явления. Так, в рамках математической модели расширения области НШ впервые предсказано существование неоднородностей в виде кумулятивных струй, явление разрыва оболочки и множественный эффект «шампанского». Установлено также, что физические процессы в оболочках могут приводить к самопроизвольному возникновению последовательности ударных волн, т.е. к автоволнам.

Погружение сферического облака в ускоренно движущийся слой газа, формирование кумулятивной струи

К.В. Краснобаев, Г.Ю. Котова, Р.Р. Тагирова (2015)

Г. Ю. Котова, К. В. Краснобаев (2020)

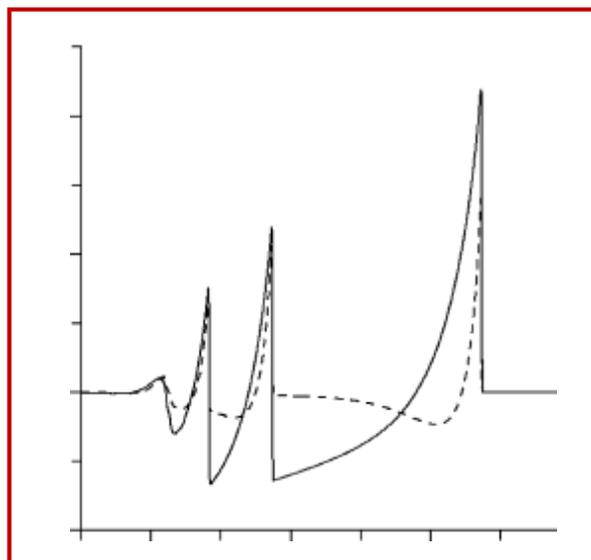
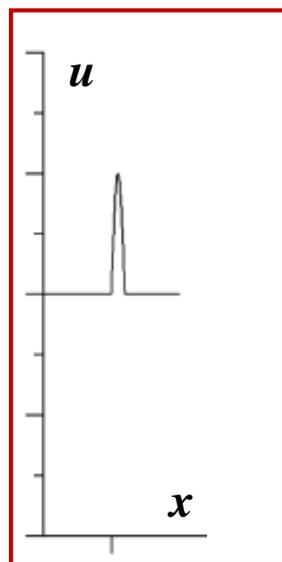


**Эволюция погружения облака в слой. Изолинии плотности.
Относительная скорость облака и слоя слева дозвуковая, справа – сверхзвуковая.
Масштабы величин произвольные.**

Возникновение последовательности ударных волн под действием малого начального возмущения скорости газа

Автоволновые движения могут являться источником неоднородностей в межзвездной среде

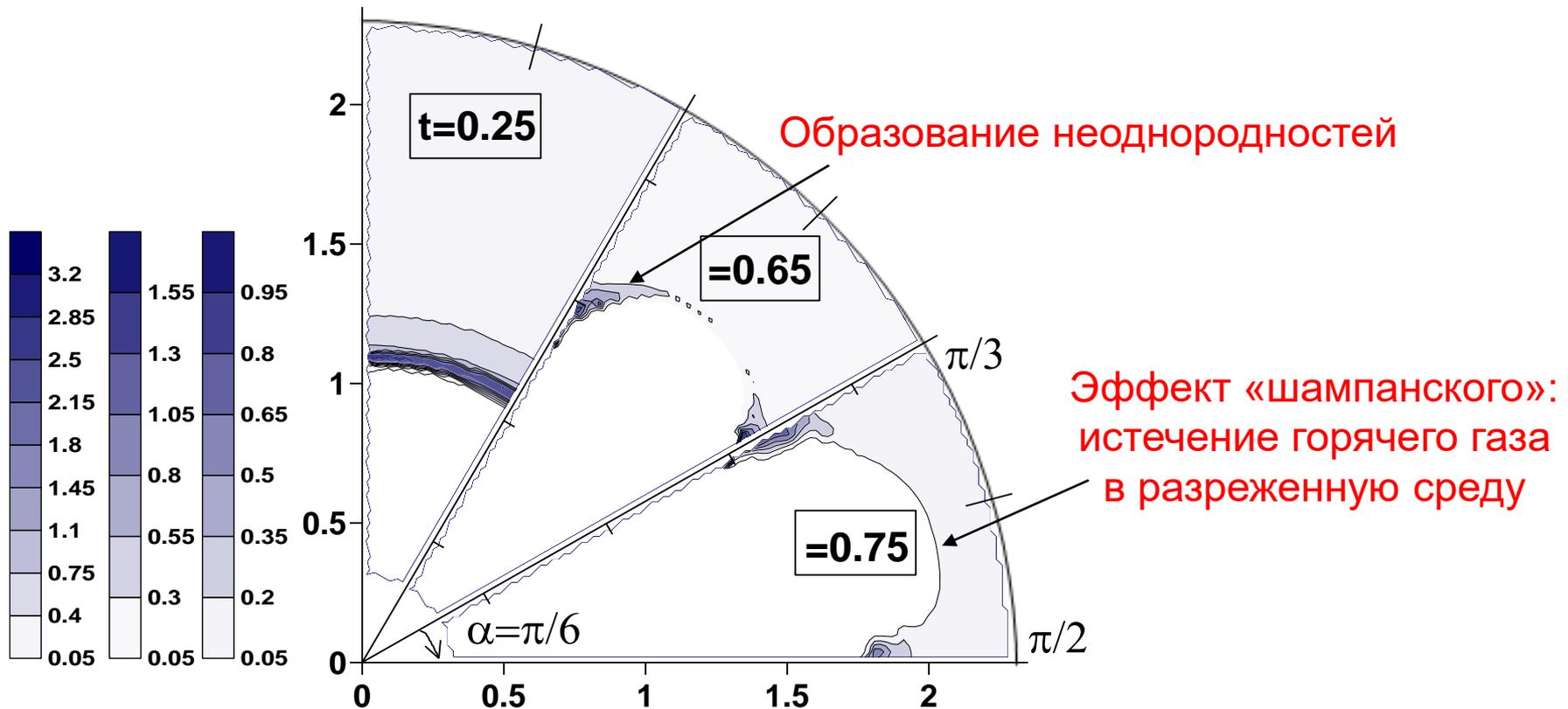
K. V. Krasnobaev, R. R. Tagirova (2017)



Распределение по координате x скорости газа u в начальный момент времени и на стадии образования автоволн - последовательности ударных волн

Явление разрушения оболочки. Эффект «шампанского»

Котова Г.Ю., Краснобаев К.В.(2010)



Изолинии плотности в разные моменты времени.

Масштабы величин произвольные.

Статьи авторов по данной теме:

1. Г.Ю. Котова, К.В. Краснобаев // Численное моделирование неустойчивых двумерных движений в фотоиспаряемой околозвездной оболочке // ПАЖ, 2010, **36**, N. 7, 506
2. K. V. Krasnobaev, R. R. Tagirova, and G. Yu. Kotova // Model of the expanding HII region RCW 82 // Astrophys. J., 2014, **786**, 90.
3. К.В. Краснобаев, Г.Ю. Котова, Р.Р. Тагирова // Двумерные возмущения ускоренного движения неоднородных газовых слоев и оболочек в межзвездной среде // ПАЖ, 2015, **41**, N. 3–4, 123.
4. K. V. Krasnobaev, R. R. Tagirova // Isentropic thermal instability in atomic surface layers of photodissociation regions // MNRAS, 2017, **469**, 1403.
5. G. Yu. Kotova, K. V. Krasnobaev // Interaction of an accelerating layer with a cloud: formation of tails and cumulative jets // MNRAS, 2020, **492**, 2229

В разные годы исследования в области газодинамики областей НИИ поддерживались грантами Российского фонда фундаментальных исследований и других ведомств.

В работе по темам проектов принимали активное участие студенты и аспиранты кафедры.

Спасибо за внимание!

КАФЕДРА АЭРОМЕХАНИКИ И ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
ауд. 1215

Наши контакты:

E-mail: kvk-kras@list.ru

gviana.k@gmail.com

