

УДК 622.235:004

С.В. Лукичев, А.С. Шишкин, К.П. Гуринов

## Реализация алгоритма моделирования границы отрыва при проектировании скважинной отбойки

S.V. Lukichev, A.S. Shishkin, K.P. Gourin

## The implementation of the algorithm of break surface simulation while designing the well breaking

**Аннотация.** Разработана методика расчета границы отрыва горной массы от массива горных пород, формирующейся в результате короткозамедленного взрыва вееров скважин, на основе имитационного моделирования процесса отделения породы от массива. Реализован инструмент моделирования границы отрыва в составе модуля проектирования подземных массовых взрывов программного комплекса MINEFRAME. Показано, что инструмент позволяет адекватно оценить возможные результаты проекта массового взрыва.

**Abstract.** A method of calculating the break surface formed as a result of blast-hole rings' short-delay blasting has been developed. The method is based on simulation modeling of a process of broken rock separation from rock mass. A modeling tool has been implemented as a part of the module for designing cave large-scale blasts included in MINEFRAME software package. It has been shown that the tool can evaluate possible outcomes of the project of cave large-scale blast properly.

**Ключевые слова:** граница отрыва, веера скважин, массовые взрывы, имитационное моделирование, блочное представление  
**Key words:** break surface, blast-hole rings, large-scale blast, simulation modeling, block view

### 1. Введение

Одной из серьезных проблем при проектировании подземных массовых взрывов (МВ) является нахождение границ отрыва горной массы (ГМ) от массива горных пород (ГП). Отсутствие надежных методик и инструментов прогнозирования границ отрыва не позволяет оптимизировать проектные решения, что в конечном итоге приводит к снижению эффективности взрывных работ, повышению уровня потерь и разубоживания полезного ископаемого.

Переход на компьютерные методы проектирования буро-взрывных работ (БВР) создает предпосылки для решения задач автоматизации проектирования и прогнозного определения границы отрыва ГМ от массива ГП. Сложность решения задачи определения поверхности отрыва проектируемого массового взрыва заключается в необходимости учета не только механизма разрушения массива от взрыва отдельного скважинного заряда вблизи свободной поверхности, но и их взаимодействия в трехмерном пространстве и времени.

Ниже приведено описание программных средств, реализующих это решение в приложении Geotech-3D горно-геологической информационной системы MINEFRAME (Наговицын и др., 2012).

### 2. Инструменты автоматизированного проектирования подземных МВ

Алгоритмы автоматизированного проектирования построены на использовании трехмерных моделей объектов геотехнологии, отражающих фактическое состояние горных работ и проектные решения, связанные с размещением скважинных зарядов в границах отбойки (Корниенко и др., 2013).

С учетом того, что проектирование скважинной отбойки является весьма трудоемким процессом, требующим соблюдения заданных параметров и ограничений, создан комплекс программных средств (инструментов), автоматизирующих это процесс. Инструменты автоматизированного проектирования решают следующие задачи:

#### 1. Нахождение основных параметров скважинной отбойки.

К таким параметрам относятся линии наименьшего сопротивления и расстояние между скважинами или их концами (при веерном размещении). Для расчета используется метод основанный на учете упруго-прочностных характеристик ГП и энергетических характеристик зарядов взрывчатого вещества (ВВ) (Лукичев, 2000).

#### 2. Автоматизированное размещение скважин в трехмерном моделируемом пространстве.

Для решения этой задачи используются алгоритмы оптимизации размещения скважин с учетом заданных параметров и ограничений, действующих в пространстве каркасных моделей выработок, выемочных единиц и рудных тел.

#### 3. Моделирование границ отрыва при взрыве группы скважинных зарядов.

Статья посвящена решению именно этой задачи, поэтому ниже методы ее решения будут описаны более подробно.

#### 4. Автоматизированное формирование технологической документации.

В рамках этой задачи формируются паспорта БВР, включающие в себя: табличное представление параметров бурения и характеристик скважинных зарядов, расчетных характеристик отбиваемой ГМ; графическое представление разрезов по веерам скважин, горизонтальных и продольных вертикальных разрезов по осям буровых выработок (Гурин и др., 2011).

### **3. Моделирование границ отрыва при взрыве группы скважинных зарядов**

В основе алгоритма лежит имитационное моделирование процесса отделения дискретных областей ГП от массива. Алгоритм использует блочное представление массива и оперирует отдельными блоками пространства, имеющими в конкретный момент времени одно из двух состояний: ГП – горная порода, не отделенная от массива; ГМ – горная порода, отделенная от массива. В ходе моделирования блоки ГП, попавшие в воронку отрыва от взрыва скважинных зарядов, изменяют свое состояние на ГМ. По завершении процесса моделирования совокупность блоков ГП, изменивших свое состояние на блоки ГМ, будут давать объем отбойки, а поверхность, сформированная общими гранями блоков ГП и ГМ, будет являться поверхностью отрыва.

Как уже было сказано ранее, инструмент моделирования границы отрыва входит в состав модуля проектирования подземных МВ приложения Geotech-3D и расширяет его возможности, позволяя оценить результаты реализации проекта.

Решение задачи нахождения поверхности отрыва разбивается на 3 этапа:

1. Формирование исходного модельного представления области МВ.
2. Имитационное моделирование процесса отделения ГП от массива.
3. Представление результатов моделирования.

### **4. Формирование исходного модельного представления области МВ**

Входными данными для алгоритма формирования границы отрыва являются:

- модели вееров скважин;
- данные о положении и форме свободной поверхности;
- данные о конструкции скважинных зарядов, включая характеристики используемого ВВ;
- упруго-прочностные характеристики массива ГП.

Модели выработок и исходной свободной поверхности создаются в трехмерной среде приложения Geotech-3D или импортируются в нее из других моделирующих систем. Модели вееров скважин, а также данные о конструкции зарядов, характеристиках ВВ и упруго-прочностных характеристиках массива ГП формируются в процессе проектирования и являются характеристиками соответствующих моделей (рис. 1).

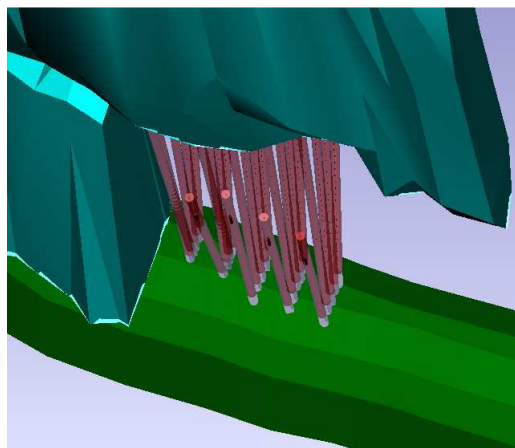


Рис. 1. Модели вееров скважин, выработки и исходной свободной поверхности

На основе данных о конструкции зарядов и характеристиках ВВ для каждого заряда вычисляется радиус зоны регулируемого дробления, являющийся ключевым параметром для определения конфигурации воронки выброса (Лукичев, 2000).

### **5. Имитационное моделирование процесса взрывного разрушения и отделения ГП от массива**

Область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед (рис. 2а), одна из граней которого параллельна первой плоскости вееров взрывааемых скважин. Таким размещением достигается повышение точности дискретизации моделируемого пространства. Размеры области

моделирования определяются как габариты вееров скважин, увеличенные на максимальный радиус зоны регулируемого дробления, что позволяет учесть все возможные результаты моделирования взрыва.

В границах области моделирования создается блочная модель, которая используется на протяжении всего процесса моделирования (рис. 2б). Блочная модель состоит из блоков одинакового размера, со следующими полями данных:

- текущее состояние блока;
- новое состояние блока (состояние, которое блок примет после очередного шага моделирования);
- указатель на скважину, взрыв которой изменил состояние блока.

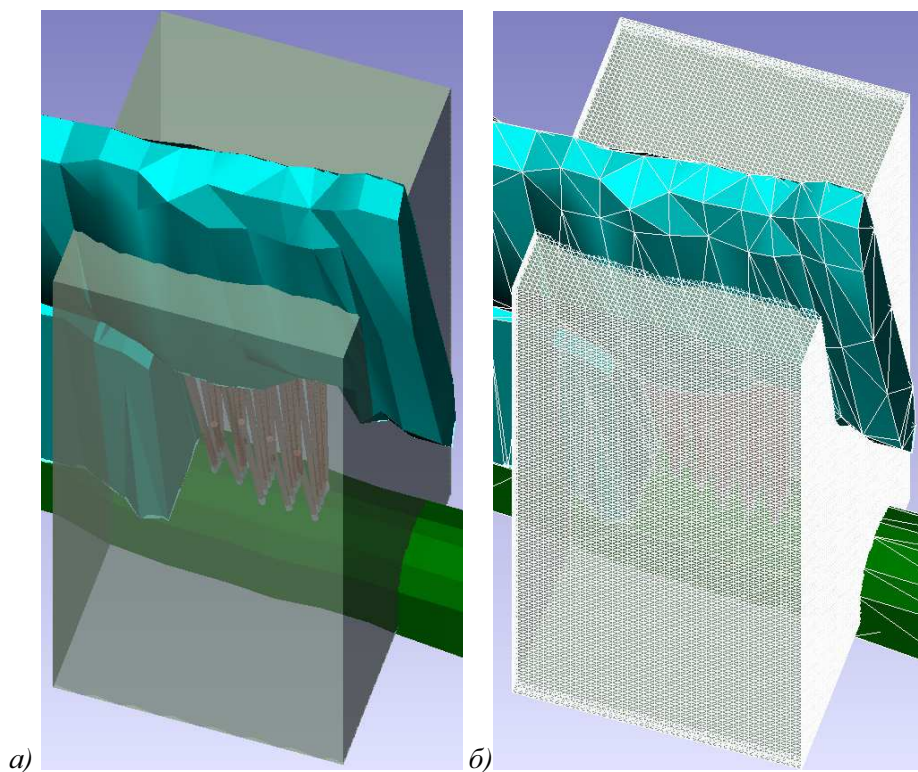


Рис. 2. Область моделирования: а) параллелепипед, ограничивающий область моделирования, б) исходный вид блочной модели в области моделирования

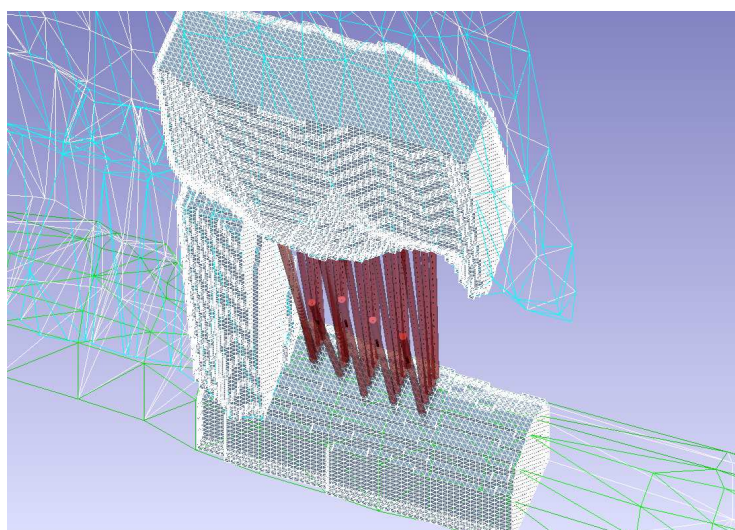


Рис. 3. Блоки с признаком ГМ, моделирующие выработку и ранее отбитое пространство

Ортогональные между собой оси блочной модели могут иметь любую ориентацию в пространстве, определяемую нормалью первой плоскости скважин. Блоки, находящиеся внутри моделей выработки и моделей, формирующих исходную свободную поверхность, получают признак ГМ (рис. 3), остальные – ГП.

Для вычисления границ воронки выброса от взрыва скважинного заряда используется формула расчета радиуса зоны регулируемого дробления для бесконечно длинного цилиндрического заряда (Лукичев, 2000). Для перехода к расчету воронки выброса от взрыва скважинного заряда (цилиндрического заряда конечной длины) последний заменяется совокупностью эквивалентных сферических зарядов (Корниенко, 2011).

Моделирование взрыва группы скважин осуществляется в соответствии со схемой их инициирования. При моделировании действия взрыва каждой последующей скважины учитываются изменения конфигурации свободной поверхности, внесенные взрывом ранее взорванных скважин.

Для моделирования поверхности отрыва реализован следующий алгоритм:

1. Для каждого блока с признаком ГМ, граничащего с блоком, имеющим признак ГП, определяется местонахождение относительно воронки выброса. С этой целью ищется суммарный вектор радиальных напряжений от сферических зарядов к центру блока (рис. 4а).

2. Если суммарный вектор радиальных напряжений от сферических зарядов к блоку ГМ превышает по модулю предельное значение напряжения отрыва, то все блоки на отрезке, проходящем вдоль суммарного вектора и соединяющем заряд и данный блок, помечаются как блоки ГМ (рис. 4б).

3. Совокупность блоков, изменивших свое состояние на ГМ, образует зону отрыва ГП от массива, формируемую взрывом текущего скважинного заряда (рис. 4в).

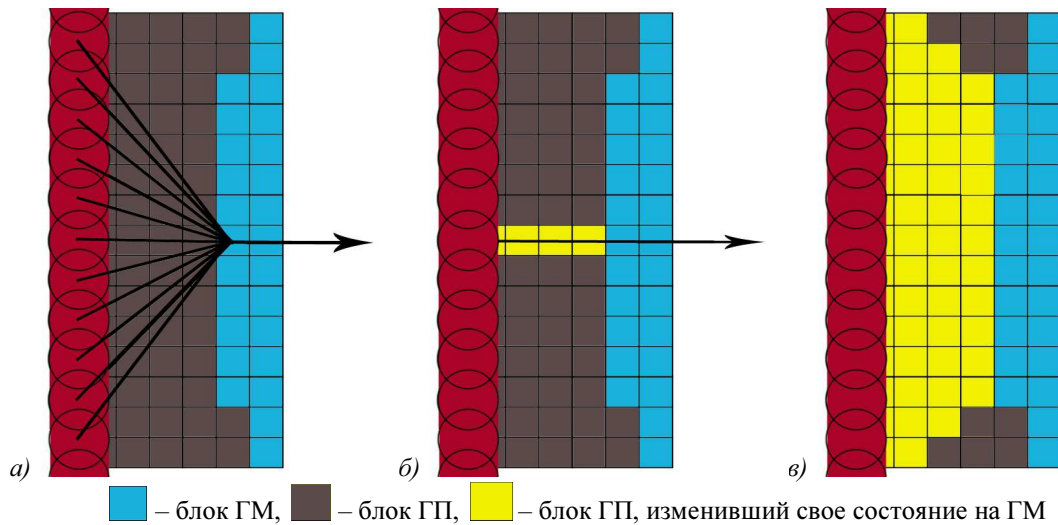


Рис. 4. Схема к алгоритму моделирования отрыва (стрелка показывает направление суммарного вектора напряжений от взрыва сферических зарядов для блока с признаком ГМ)

Чтобы получить поверхность отрыва по блокам ГП, граничащим с блоками ГМ, строится каркасная модель поверхности отрыва. Треугольники каркаса формируются из тех граней, которые одновременно принадлежат блоку ГМ и блоку ГП (рис. 5).

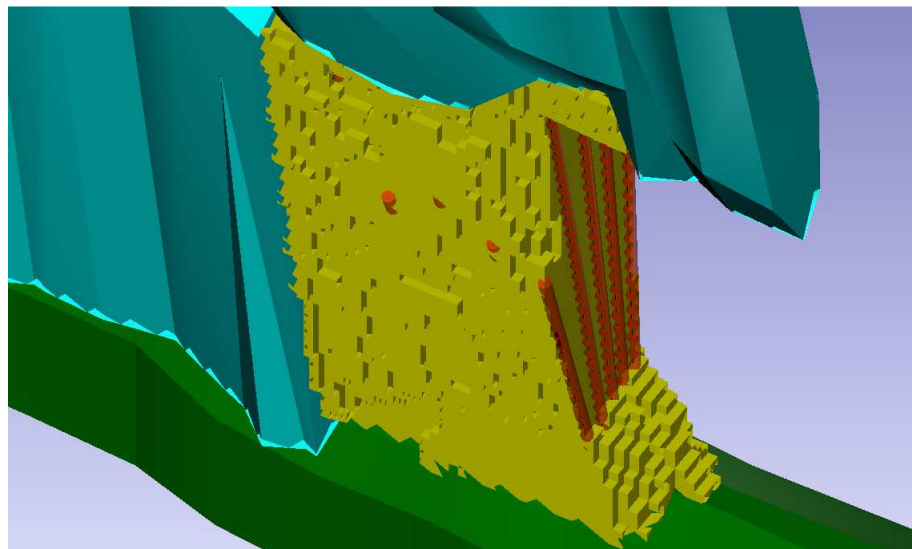


Рис. 5. Каркасная модель, построенная по блочной модели зоны отрыва ГМ от массива ГП

## 6. Представление результатов моделирования

Одним из эффектов использования блочного представления массива ГП для моделирования поверхности отрыва является то, что в получаемой каркасной модели поверхности отрыва сильно выражен эффект ступенчатости (рис. 5). Чтобы устранить ступенчатость и получить более плавную модель поверхности, используется процедура сглаживания (рис. 6).

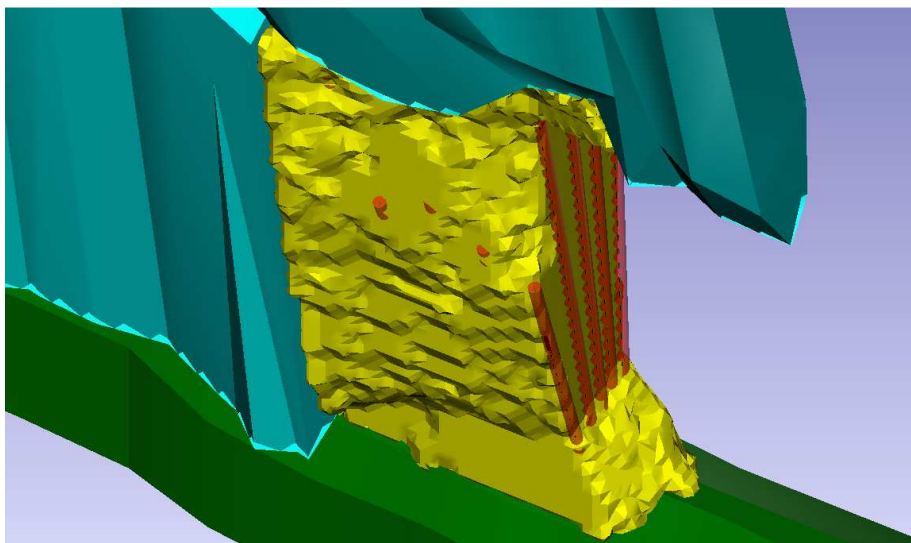


Рис. 6. Сглаженная каркасная модель поверхности отрыва ГМ от массива ГП

Результаты моделирования могут быть представлены в удобном для анализа виде:

- каркасная модель поверхности отрыва;
- контур разреза каркасной модели поверхности отрыва плоскостью веера с отображением на разрезе скважин, зарядов ВВ, соседних выработок, а также блочной модели распределения качественных характеристик полезного ископаемого;
- контур разреза каркасной модели поверхности отрыва вертикальной и горизонтальной плоскостями, ориентированными по оси выработки.

## 7. Заключение

Алгоритм моделирования границы отрыва ГМ от массива ГП был реализован в виде комплекса программных средств (инструмента) приложения Geotech-3D и протестирован на ряде проектов МВ. В ходе проверки было установлено, что получаемая модель адекватно описывает положение границы отрыва при короткозамедленном взрыве вееров скважин вблизи свободной поверхности. Наличие данного инструмента в составе программных средств автоматизированного проектирования подземных массовых взрывов позволяет уже на стадии проектирования прогнозировать результаты их практической реализации.

## Литература

- Гурин К.П., Целищев С.П. Создание инструментальных средств автоматизированного проектирования подземных массовых взрывов на платформе системы Mineframe // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 50-летию Горного ин-та КНЦ РАН. Апатиты – СПб., Реноме, 2011. С. 240-245.
- Корниенко А.В. Развитие методов автоматизированного проектирования карьерных массовых взрывов на основе моделирования условий взрывания и параметров разрушения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Апатиты, 2011. 22 с.
- Корниенко А.В., Гурин К.П. Автоматизированное проектирование массовых взрывов при ведении открытых и подземных горных работ // Вопросы осушения, геологии и геоинформатики, геомеханики, специальных горных работ и горных технологий: матер. 12 междунар. симпоз. Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Белгород, ВИОГЕМ, 2013. С. 284-295.
- Лукичёв С.В. Управление подземными массовыми взрывами при отбойке руд с использованием компьютерных технологий. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 40 с.
- Наговицын О.В., Лукичёв С.В. Развитие методов моделирования горно-геологических объектов в системе MINEFRAME // Информационные технологии в горном деле: доклады Всерос. науч. конф. с междунар. участием 12-14 октября 2011 г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2012. С. 142-147.

## References

- Gurin K.P., Tselishev S.P.** Sozdanie instrumentalnykh sredstv avtomatizirovannogo proektirovaniya podzemnykh massovykh vzryivov na platforme sistemy Mineframe [Creating computer-aided design tools for designing cave large-scale blasts in the Mineframe system] // Problemy i tendentsii ratsionalnogo i bezopasnogo osvoeniya georesurov: sb. dokl. Vseros. nauch.-tehn. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyaschennoy 50-letiyu Gornogo in-ta KNTs RAN. Apatityi – SPb., Renome, 2011. P. 240-245.
- Kornienko A.V.** Razvitiye metodov avtomatizirovannogo proektirovaniya karernykh massovykh vzryivov na osnove modelirovaniya usloviy vzryivaniya i parametrov razrusheniya [Development of computer-aided methods for designing open-pit large-scale blasts on the basis of simulation of explosion conditions and fracture parameters]. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Apatityi, 2011. 22 p.
- Kornienko A.V., Gurin K.P.** Avtomatizirovannoe proektirovaniye massovykh vzryivov pri vedenii otkrytykh i podzemnykh gornykh rabot [Computer-aided design of large-scale blasts in the management of open pit and underground mining operations] // Voprosy osusheniya, geologii i geoinformatiki, geomehaniki, spetsialnykh gornykh rabot i gornykh tekhnologii: mater. 12 mezhdunar. simpoz. Osvoenie mestorozhdeniy mineralnykh resursov i pozemnoye stroitelstvo v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh. Belgorod, VIOGEM, 2013. P. 284-295.
- Lukichyov S.V.** Upravlenie podzemnyimi massovymi vzryivami pri otboyye rud s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologiy [Management of underground large-scale blasts at breaking of ores using computer technologies]. Avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. M., 2000. 40 p.
- Nagovitsyin O.V., Lukichyov S.V.** Razvitiye metodov modelirovaniya gorno-geologicheskikh ob'ektov v sisteme MINEFRAME [Development of methods for modeling mining and geological objects in the MINEFRAME system] // Informatsionnyye tekhnologii v gornom dele: dokladyi Vseros. nauch. konf. s mezhdun. uchastiem 12-14 oktyabrya 2011 g. Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2012. P. 142-147.

## Информация об авторах

**Лукичев Сергей Вячеславович** – Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, зам. директора института, зав. лабораторией, e-mail: lu24@goi.kolasc.net

**Lukichev S.V.** – Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Deputy Director, Head of Laboratory, e-mail: lu24@goi.kolasc.net

**Шишкин Александр Сергеевич** – Горный институт КНЦ РАН, аспирант, e-mail: shishkin@goi.kolasc.net.ru

**Shishkin A.S.** – Mining Institute KSC RAS, Ph.D. Student, e-mail: shishkin@goi.kolasc.net.ru

**Гурин Константин Павлович** – Горный институт КНЦ РАН, вед. программист, e-mail: gourin@goi.kolasc.net.ru

**Gourin K.P.** – Mining Institute KSC RAS, Senior Programmer, e-mail: gourin@goi.kolasc.net.ru