



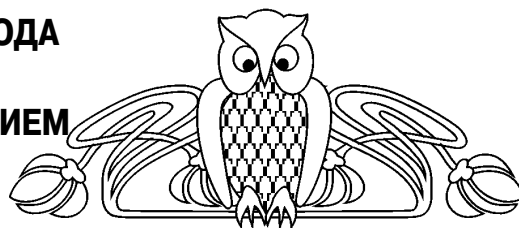
## Библиографический список

1. Маергойз И. М. Территориальная структура хозяйства. Новосибирск, 1986. 304 с.
2. Бабурин В. Л. Эволюция российских пространств: от Большого взрыва до наших дней (инновационно-синергетический подход). М., 2002. 272 с.
3. Цихан Т. В. Кластерная теория экономического развития // Теория и практика управления. 2003. № 5. С. 17–24.

4. Rainer L. Fragmentierte Wirtschaftsstrukturen zwischen Deindustrialisierung, Stagnation und Innovation // Berliner Debatte Initial. 2006. № 5. S. 27–38.
5. Статистическая служба федеральной земли Саксония. URL: <http://www.statistik.sachsen.de/html/499.htm>. Zeitschrift\_2011\_1.pdf (дата обращения: 19.05.2011).
6. Статистическая служба федеральной земли Саксония-Ангальт. URL: [http://www.sachsen-anhalt.de/index.php?id=6156.Gesamtbericht\\_2010.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/index.php?id=6156.Gesamtbericht_2010.pdf) (дата обращения: 18.05.2011).

УДК 55:004:622.992.2–032.32:504()

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКА ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ АВАРИИ НА УЧАСТКЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА (НА ПРИМЕРЕ ПЕТРОВСКОГО РАЙОНА САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



А. В. Молочко, П. С. Жучков

Саратовский государственный университет,  
кафедра геоморфологии и геоэкологии  
E-mail: farik26@yandex.ru

В статье рассмотрено моделирование риска чрезвычайной ситуации при аварии на модельном участке магистрального газопровода Петровского района Саратовской области с применением геоинформационных систем. Приведены методики расчета зон детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси газа при аварийной разгерметизации газопровода с учетом направления и скорости ветра.

**Ключевые слова:** геоинформационные технологии, риск аварии, имитационное моделирование, магистральный газопровод, Саратовская область.

### Imitating Modeling of Emergency Situation Risk During Accident on Model Part of Gas Main (with Petrovskiy District of Saratov Region as an Example) with GIS Technologies Application

A. V. Molochko, P. S. Zhuchkov

The article represents risk modeling of emergency situation during accident of model part of Petrovskiy district (Saratov region) gas main with GIS technologies using. Also methods of detonation zones estimation and cloud of dangerously explosive blend spreading estimation during accident gas main depressurization subject to wind direction and speed are represented.

**Key words:** geoinformation (GIS) technologies, accident risk, imitating modeling, gas main, Saratov region.

Газовая отрасль Российской Федерации представляет собой сложную систему, которая включает геологоразведочные работы, добычу, транспортировку, хранение и переработку газа. Степень влияния этих подотраслей на окружающую среду различна,

так же как и различен обратный отклик. Характер, силу, степень и последствия подобного взаимного воздействия целесообразно изучать с помощью инструментов современного риск-анализа [1, 2].

Предприятия газовой отрасли следует рассматривать как источник комплексного и концентрированного воздействия на окружающую среду, прежде всего, через гидро-, лито- и атмосферу.

Самый чувствительный экологический урон приносят аварии на этапе транспортировки природного газа.

Большое развитие трубопроводная транспортировка газа получила в Саратовской области. В настоящее время на территории области пролегают такие крупные магистральные газопроводы, как: «Саратов–Москва», «Средняя Азия–Центр», «Уренгой–Новопсков», «Саратов–Горький», «Союз», «Мокроус–Тольятти», «Челябинск–Петровск». Газопроводы, проходящие по территории Саратовской области, имеют высокий уровень изношенности. В связи с этим имеют место аварии на транспортных магистралях, которые наносят немалый ущерб окружающей среде.

Одним из важнейших газотранспортных узлов Саратовской области является Петровский район.

### Общая характеристика Петровского района

Петровский муниципальный район занимает территорию площадью 2,3 тыс. км<sup>2</sup> в северной части Саратовского Правобережья и граничит с Пензенской областью на севере и 4 районами Саратовской области: Екатериновским на западе, Аткарским и Татищевским на юге, Новобурасским на востоке. Районный центр – г. Петровск [3].



Район находится в узле инфраструктурных коммуникаций (прежде всего, газотранспортных), в месте пересечения их ландшафтной осью – долиной р. Медведица. Автомобильная дорога

федерального значения Нижний Новгород–Саратов пересекается здесь железной дорогой местного значения – Калининск–Аткарск–Сенная (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная карта Петровского района



В геоморфологическом отношении территория Петровского района расположена на западных отрогах Приволжской возвышенности и приурочена к денудационной, пологоволнистой равнине, с различной степенью всхолмленности. Общий уклон поверхности равнины наблюдается в сторону р. Медведицы. Преобладающие высоты на территории района составляют 200–250 м, с перепадами высот от 120 м на юго-востоке до 320 м на юге у с. Озерки на Волго-Медведицком водоразделе. По густоте эрозионного расчленения рельеф относится к слабо- и среднерасчленённому, местами расчленённость территории сильная. Густота долинно-балочного расчленения территории в среднем составляет 0,6–1,5 км/км<sup>2</sup> [4].

Климат Петровского муниципального района, учитывая его расположение на территории Саратовской области, континентальный с холодной зимой и жарким летом. Территория района характеризуется значительными сезонными и суточными колебаниями температур воздуха [5].

В течение года в районе преобладают ветры западного, юго-западного, восточного и юго-восточного направлений.

Зимой преобладают восточные, юго-западные и юго-восточные, а летом северо-западные и северо-восточные ветры. Средняя скорость ветра варьирует от 4,2 до 4,6 м/с.

В почвенном покрове района доминируют чернозёмы выщелоченные и обыкновенные, в долине р. Медведица встречаются аллювиально-дерновые, а в северной части тёмно-серые и серые лесные почвы. Отдельными пятнами на территории района встречаются комплексы чернозёмных почв с солонцами 10–25% и 25–50%. Образование солонцов связано с засоленностью почвообразующих пород [6].

### Газовая инфраструктура Петровского района

Источником газоснабжения Петровского муниципального района является природный газ, который подается в район по магистральным газопроводам: «Саратов–Горький» (протяженность (по району) 49,6 км), «Средняя Азия–Центр» (САЦ) (протяженность 52,2 км), «Челябинск–Петровск» (протяженность 33,4 км), «Петровск–Новопсков» (протяженность 32,2 км). В северо-восточной части Петровского района в одном коридоре с магистральным газопроводом «Челябинск–Петровск» проходят магистральные газопроводы: «Уренгой–Петровск» (протяженность 33,4 км) и «Уренгой–Новопсков» (протяженность 65,6 км). В западной части Петровского района магистральный газопровод «Уренгой–Новопсков» идет в одном коридоре с магистральным газопроводом «Петровск–Новопсков». В одном коридоре магистрального газопровода «Средняя Азия–Центр» проходят 3 нитки: САЦ 1, САЦ 2, САЦ 3. В одном коридоре с магистральным газопроводом «Средняя Азия–Центр» проходит магистральный

газопровод «Петровск–Елецк» (протяженность 29,7 км). В одном коридоре с магистральным газопроводом «Горький–Саратов» проходят две нитки магистрального газопровода «Сторожовка–Петровск» (протяженность 34,4 км) [3].

Общая протяженность газопроводов высокого давления на территории Петровского муниципального района составляет 309,94 км [4].

Находясь в постоянном взаимодействии с природой, человек все острее ощущает необходимость налаживания взаимосвязи с окружающей средой.

Как правило, взаимовлияние трубопроводных комплексов и природной среды носит негативный характер. Отсюда и основная задача, с одной стороны, свести к минимуму техногенные воздействия в период строительства и эксплуатации трубопроводов, с другой – ослабить отрицательное влияние природных компонентов на их надежность и безопасность. Выполнению обозначенной задачи способствует использование методов геоэкологического риск-анализа [1, 2, 7].

Общую схему геоэкологического риск-анализа объектов транспортировки газа можно представить в следующем виде [1]:

1. Идентификация риска.
2. Выявление источников риска.
3. Определение факторов геоэкологического риска.
4. Определение реципиентов риска.
5. Выбор методов оценки риска.
6. Управление риском:
  - построение на основе выбранной методики прогнозов относительно дальнейшего развития процессов, создание сценариев;
  - разработка рекомендаций по снижению риска и предотвращению последствий рискованных ситуаций, мониторинговых мер по слежению за опасными с точки зрения возникновения риска объектами и явлениями.

Основные факторы геоэкологического риска аварий на трубопроводах можно разделить на две группы – техногенные и природные. К техногенным можно отнести дефекты труб, ошибки при монтаже линии, нарушения профиля и плана траншеи газопровода, повреждения при земляных работах и т. п. Исключение подобных причин достигается путем соблюдения технологической дисциплины и проведения соответствующих контрольных мероприятий.

К природным причинам относятся коррозия различных видов и механическое воздействие грунтов (геоморфологические факторы риска, почвенные факторы риска) [8]. Интенсивность данных процессов определяется в основном региональными особенностями территории. Важнейшие из них – температура и влажность грунта – так или иначе зависят от морфометрических и морфологических характеристик рельефа: крутизны и экспозиции склонов, степени выраженности бровок и тыловых швов, глубины расчленения рельефа [9].



На долю магистральных газопроводов приходится подавляющее число крупных аварий и отказов во всей газовой промышленности. Трассы магистральных газопроводов часто проходят по густонаселенным районам с развитой промышленной, транспортной и сельскохозяйственной инфраструктурами. Линейная часть трубопроводов является потенциально опасным объектом и обладает огромным энергетическим потенциалом, способным оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду. Основной причиной аварий на трубопроводах является коррозия (36% всех отказов) [9]. В связи с этим особое значение приобретает задача по зонированию территории в полосе прохождения трассы и прогнозированию параметров опасных зон для населения и территорий [10].

При выборе методов оценки риска аварий на магистральных газопроводах особое внимание следует уделить картографическим и модельным [1, 2, 7]. В частности, имитационное моделирование с применением геоинформационных технологий (при этом под имитационным моделированием понимается метод, позволяющий строить модели, которые могут описывать соответствующие процессы так, как они могли бы протекать в действительности) позволит не только создавать оперативные прогнозы, но и, что наиболее важно, разрабатывать рекомендации по снижению риска и ликвидации последствий чрезвычайной аварийной ситуации.

В данной статье представлена методика расчета зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси при аварии на магистральном газопроводе.

В качестве возможных участков максимального проявления геоэкологического риска аварии на магистральном газопроводе и последующего имитационного моделирования зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси для территории Петровского района были выделены (рис. 2):

1) участок № 1. Пересечение газопроводами «Уренгой–Новопсков» и «Петровск–Новопсков» рр. Сосновка и Казачка. Расстояние до ближайшего населенного пункта дер. Сосновка 1-я составляет 700 м (в северном направлении); расстояние до железной дороги – 600 м (на восток), до автодороги – 400 м (на запад). Высоты рельефа в пределах 180–200 м;

2) участок № 2. Газопровод «Саратов–Горький». Территория находится на расстоянии 200 м от северо-западной окраины г. Петровск. Газопровод пролегает в почве с относительно высоким содержанием солей (в солончаках черноземных с черноземами 25–50%), что может способствовать в совокупности с другими факторами его разрушению. Высота рельефа в пределах 200–240 м. Немаловажный фактор – наличие на этом участке линий электропередач, которые могут послужить

дополнительным катализатором процесса коррозии газопровода;

3) участок № 3. Местоположение – 6,5 км к востоку от г. Петровск. Пересечение газопроводами «Уренгой–Новопсков» и «Челябинск–Петровск» р. Медведица. Расстояние до ближайших населенных пунктов: до дер. Бобровка – 1,3 км, до дер. Антиповка – 2,6 км, до центра муниципального образования – с. Синенькие – 3,7 км.; расстояние до железной дороги – 1,5 км, до автодороги – 1,1 км. Газопровод проходит по аллювиальным почвам. Высоты рельефа в пределах коридора прохождения газопровода – 175–215 м.

Для участка № 3 было проведено имитационное моделирование с использованием возможностей геоинформационных систем, заключающееся в прогнозировании последствий аварии в случае разрыва газопровода «Челябинск–Петровск» ( $P_r = 7,5$  МПа) в месте перегиба рельефа в пойме р. Медведица.

Методика расчета зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси

Аварии при разгерметизации газопроводов сопровождаются следующими процессами и событиями: истечением газа до срабатывания отсекающей арматуры (импульсом на закрытие арматуры является снижение давления продукта); закрытием отсекающей арматуры; истечением газа из участка трубопровода, отсеченного арматурой.

В местах повреждения происходит истечение газа под высоким давлением в окружающую среду. На месте разрушения в грунте образуется воронка. Метан поднимается в атмосферу (легче воздуха), а другие газы или их смеси оседают в приземном слое. Смешиваясь с воздухом, газы образуют облако взрывоопасной смеси.

Статистика показывает, что примерно 80% аварий сопровождается пожаром.

Взрывное горение при авариях на газопроводе может происходить по одному из двух режимов – дефлаграционному или детонационному.

При оперативном прогнозировании принимают, что процесс развивается в детонационном режиме.

Дальность распространения облака взрывоопасной смеси в направлении ветра определяется по эмпирической формуле [11]

$$L = 25 \sqrt{M/W}, \quad (1)$$

где  $M$  – массовый секундный расход газа, кг/с;

25 – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность  $\text{м}^3/2/\text{кг}^{1/2}$ ;

$W$  – скорость ветра, м/с.

При этом граница зоны детонации, ограниченная радиусом  $r_0$ , в результате истечения газа за счет нарушения герметичности газопровода, может быть определена по формуле

$$r_0 = 12,5 \sqrt{M/W}, \quad (2)$$

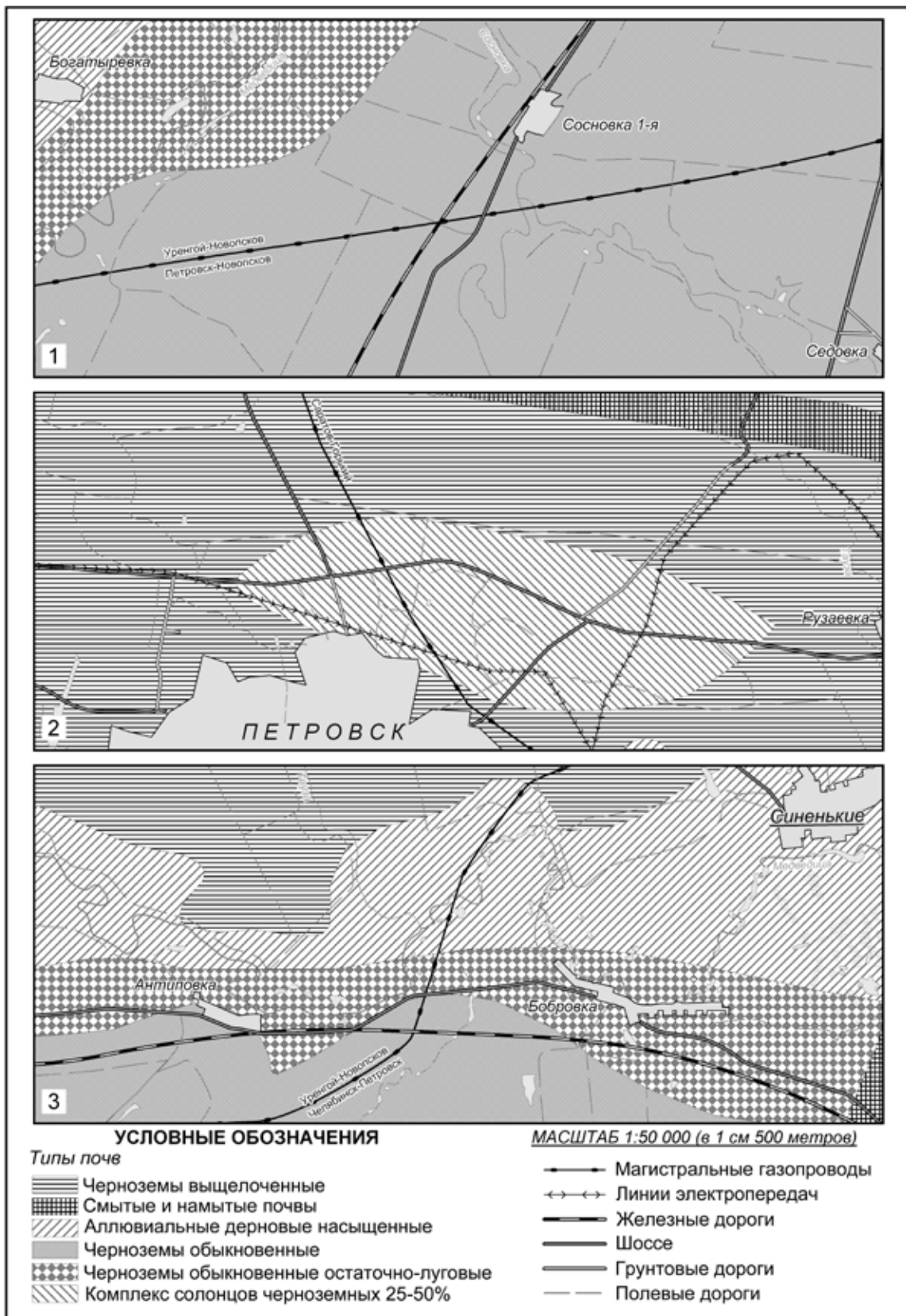


Рис. 2. Модельные участки территории Петровского района



Массовый секундный расход газа  $M$  из газопровода для критического режима истечения, когда основные его параметры (расход и скорость истечения) зависят только от параметров разгерметизированного трубопровода, может быть определен по формуле

$$M = \Psi \cdot F \cdot \mu \sqrt{P_r / V_r}, \quad (3)$$

где  $\Psi$  – коэффициент, учитывающий расход газа от состояния потока (для звуковой скорости истечения  $\Psi = 0,7$ );

$F$  – площадь отверстия истечения, принимаемая равной площади сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;

$\mu$  – коэффициент расхода, учитывает форму отверстия ( $\mu = 0,7 \dots 0,9$ ), в расчетах принимается  $\mu = 0,8$ ;

$P_r$  – давление газа в газопроводе, Па;

$V_r$  – удельный объем транспортируемого газа при параметрах в газопроводе (определяется по формуле (4)).

$$V_r = R_0 \frac{T}{P_r}, \quad (4)$$

где  $T$  – температура транспортируемого газа, К;

$R_0$  – удельная газовая постоянная, определяемая по данным долевого состава газа  $q_k$  и молярным массам компонентов смеси из соотношения:

$$R_0 = 8314 \sum_{i=1}^n q_k / m_k, \quad (5)$$

где 8314 – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К);

$m_k$  – молярная масса компонентов, кг/кмоль;

$n$  – число компонентов.

При прогнозировании последствий случившейся аварии на газопроводе зону детонации принимают с учетом направления ветра, считая, что границы зоны детонации распространяются от трубопровода по направлению ветра на расстояние  $2r_0$ . В случае заблаговременного прогнозирования зона детонации определяется в виде полос вдоль всего трубопровода шириной  $2r_0$ , расположенных с каждой из его сторон. Это связано с тем, что облако взрывоопасной смеси может распространяться в любую сторону от трубопровода, в зависимости от направления ветра.

При проведении оперативных расчетов температура транспортируемого газа может быть принята  $t = 40^\circ\text{C}$ . Состав обычного газа при отсутствии данных может быть принят в соотношении: метан ( $\text{CH}_4$ ) – 90%; этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) – 4%; пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) – 2%; н-бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) – 2%; изопентан – ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) – 2% [11].

Если спроецировать пункт «Порядок нанесения зон заражения сильнодействующими ядовитыми веществами на топографические карты и схемы», изложенный в РД 52.04.253-90, на данную методику, то можно полагать, что зона возможного распространения облака взрывоопасной смеси на картах (схемах) ограничена окружностью, полуокружностью или сектором. Центр окружности,

полуокружности или сектора совпадает с местом разрыва газопровода.

1. При скорости ветра по прогнозу меньше 0,5 м/с зона детонации имеет вид окружности. Радиус окружности равен  $r_0$ .

2. При скорости ветра по прогнозу 0,6–1 м/с зона детонации имеет вид полуокружности. Угол участка равен  $180^\circ$ , биссектриса угла совпадает с осью следа облака и ориентирована по направлению ветра.

3. При скорости ветра по прогнозу больше 1 м/с зона детонации имеет вид сектора. Радиус сектора равен  $2r_0$ , биссектриса сектора совпадает с осью следа облака и ориентирована по направлению ветра. При скорости ветра 1,1–2 м/с угол сектора равен  $90^\circ$ , при скорости более 2 м/с угол сектора составляет  $45^\circ$ .

По методике, изложенной выше, были произведены расчеты зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси для различных скоростей ветра.

Полученные результаты:

– 0,4 м/с:  $L = 4452,5$  м,  $r_0 = 2226,25$  м;

– 0,8 м/с:  $L = 3148,4$  м,  $r_0 = 1574,2$  м;

– 3 м/с:  $L = 1625,8$  м,  $r_0 = 812,9$  м.

Картографическое моделирование полученных результатов производилось в программном продукте MapInfo 8.5. Professional.

С помощью программного обеспечения было произведено наложение облаков взрывоопасной смеси, радиус которых был рассчитан, на модельный участок № 3 (рис. 3).

При изображении зоны детонации для скорости 0,4 м/с была проведена окружность с радиусом  $r_0$ , для скорости 3 м/с – сектор (угол  $45^\circ$ , радиус  $2r_0$ ), для скорости 0,8 м/с – полуокружность (радиус имеет размерность усредненного значения в пределах  $r_0$  и  $2r_0$  в силу действия ветра, имеющего небольшую скорость).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при данном направлении ветра во время аварии на газопроводе в зону распространения облака взрывоопасной смеси попадет большая часть населенного пункта (дер. Бобровка), в котором проживает 118 жителей (по состоянию на 01.01.2008 г.), а также транспортные магистрали (автодорога Петровск–Бурасы, железная дорога Калининск–Аткарск–Сенная).

Случай заблаговременного прогнозирования, в котором не учитывается направление ветра, рассчитанный по предложенной методике, можно представить в виде рис. 4.

Зона детонации определяется в виде буферной зоны вдоль всего газопровода шириной  $2r_0$  по каждую из сторон. В прогнозируемую зону детонации, помимо большей части дер. Бобровка (Пригородное МО), полностью попадает с. Синенькие (центр Синеньского МО), в котором проживает 524 человека (01.01.2008 г.), а также дер. Антиповка (Пригородное МО) с населением

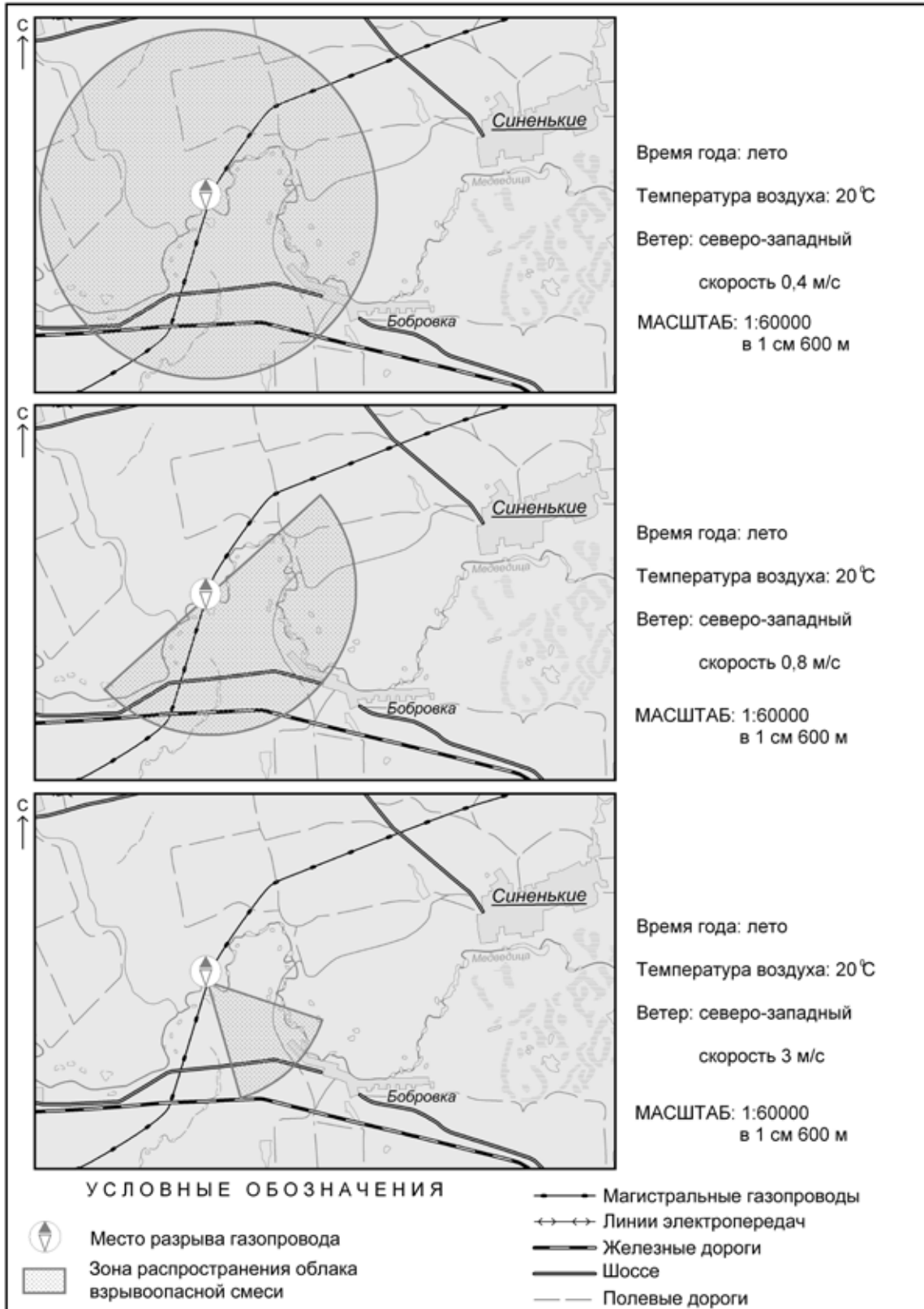


Рис. 3. Дальность распространения облака взрывоопасной смеси при разгерметизации магистрального газопровода (модельный участок № 3)



Рис. 4. Моделирование зоны детонации при возможной разгерметизации газопровода

27 человек (01.01.2008 г.). Кроме населенных пунктов в зону возможного распространения облака взрывоопасной смеси попадают две автодороги (Саратов–Кузнецк и Петровск–Бурасы) и железная дорога Калининск–Аткарск–Сенная.

Применение методов современного риск-анализа геоэкологических рисков, в частности картографического и модельного метода оценки зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси при аварии на магистральном газопроводе с применением геоинформационных технологий, не только способствует созданию прогнозов, но и помогает разработать рекомендации по снижению риска и существенному снижению и даже предотвращению последствий рисков ситуации. Все это призвано снизить размер ущерба природе, инфраструктуре, а также избежать человеческих потерь.

#### Библиографический список

1. Молочко А. В. Геоинформационное картографирование геоэкологических рисков эксплуатации нефтяных месторождений (на примере Саратовской области) // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. 2010. Сер. Науки о Земле, вып. 1, Т. 10. С. 35–40.
2. Molochko A. V., Khvorostukhin D. P. Methods of geoecological risks' geoinformational mapping of oilfield exploitation (Saratov region as an example): using aspects // Представляем научные достижения миру. Естественные науки : материалы науч. конф. молодых ученых «Presenting Academic Achievement to the World» (Саратов, 29–30 марта 2010 г.). – Саратов, 2010. С. 82–89.

3. Схема территориального планирования Петровского муниципального района Саратовской области : в 3 т. Т. 2. Проектные предложения по территориальному развитию района. 2009. 198 с.
4. Наумов А. Д., Ковальский Ф. И. Геоморфологическая карта Среднего и Нижнего Поволжья. Саратов, 1982.
5. Эколого-ресурсный атлас Саратовской области. Саратов, 1996.
6. Почвенная карта Саратовской области. Киев, 1989.
7. Молочко А. В. Методика проведения геоэкологического риск-анализа нефтедобывающей отрасли с использованием // Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Саратов 19–22 октября 2010 г.). Саратов, 2010. С. 399–402.
8. Бородавкин П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М., 1986. 62 с.
9. Учебное пособие для студентов инженерно-строительных специальностей всех форм обучения / сост.: С. И. Одинцов; Кубан. гос. технол. ун-т. Краснодар, 2006. 405 с.
10. «ООО НПП Титан-Оптима» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.titan-optima.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=46&Itemid=44](http://www.titan-optima.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=46&Itemid=44) (дата обращения: 20.03.2011).
11. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций : учебник : в 3 ч. Ч. 2. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций : в 3 кн. Кн. 2. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях / под общ. ред. С. К. Шойгу. М., 1998. 166 с.