

РОЛЬ ВЕТРА В ФОРМИРОВАНИИ ОБЛАКА ИЗ СМЕСИ МЕТАНА И ВОЗДУХА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ МЕТАНА ИЗ МОЩНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

В.М. Хазинс, В.В. Шувалов

Исследовано влияние ветра на формирование облака из смеси метана и воздуха при струйном истечении метана из мощного геологического источника. Показано, что ветер несколько видоизменяет механизм переноса метана из струи в облако по сравнению со случаем невозмущенной ветрами атмосферы и в значительной мере влияет на высоту всех облачных структур. Проведенные расчеты продемонстрировали, что с ростом размеров струи может образовываться протяженная в вертикальном направлении область с параметрами, достаточными для воспламенения.

Введение

В работах [Хазинс, 2006; Хазинс, 2012] представлены результаты исследования динамики всплытия больших выбросов метана из геологических источников. Цель исследований заключалась в оценке условий, при которых подобные выбросы могут достигать стратосферы, где в результате химических реакций с образованием воды и компонентов водородной группы (H , OH , HO_2 и т.д.) они могут привести к нарушению динамического равновесия и локальному уменьшению концентрации озона.

Для упрощения численного моделирования в указанных работах предполагалось, что время выброса метана много меньше характерного времени его всплытия в атмосфере до максимальной высоты. Тогда в первом приближении можно считать, что в начальный момент выброшенный метан занимает сферический объем у поверхности Земли. Характер течения и область подмешивания окружающего воздуха в случаях всплытия метанового пузыря и потока метана в виде струи принципиально отличны. Можно предположить, что при одинаковой массе выброса эффективное подмешивание окружающего воздуха в струю, начиная с ее основания, уменьшит максимальную высоту подъема по сравнению со случаем всплытия сферического объема. Поэтому расчеты всплытия метановых пузырей позволяют определить максимальную высоту облака при различных видах истечения метана. Однако это лишь качественные соображения, требующие дополнительных подтверждений. Исследования проще всего вести численными методами, так как натуральные эксперименты крайне затруднены масштабом явления и трудностью наблюдений, а мелкомасштабные не дают оснований для пересчета по подобию.

Истечение метана в виде струи порождает еще ряд вопросов. Оценки показывают, что мощные источники метана, к которым относятся, в частности, гря-

зовые вулканы, обеспечивают поступление метана в атмосферу со скоростями лишь в несколько метров в секунду, что сравнимо со скоростями приземных ветров. Поэтому есть вероятность, что поступающий метан будет увлекаться ветровыми потоками, перемешиваться с окружающим воздухом, и струя вообще не будет формироваться. Ответ на этот вопрос зависит от ускорения метановой струи в вертикальном направлении за счет положительной плавучести метана и скорости подмешивания окружающего воздуха. Наконец, весьма интересно оценить в какой области струи метан способен к воспламенению. Эта область ограничена высотой, на которой концентрация смеси падает до стехиометрического значения.

Частично ответы на поставленные вопросы нашли свое отражение в отчете [Хазинс и Шувалов, 2012]. Здесь же представлено дальнейшее их развитие.

Отметим, что из обзора выбросов метана из геологических источников, приведенного, например, в работах [Хазинс, 2006; Хазинс, 2012], следует, что грязевые вулканы (основной источник выбросов) могут исторгать в процессе извержения до $5 \times 10^8 \text{ м}^3$ газа. Еще большие объемы выбросов связывают с подводными газогидратными залежами. Метановые плюмы из океанической коры достигают сотен метров по высоте и нескольких километров по ширине. По оценкам [Makogon, 1994] максимальный объем метановых выбросов из газогидратных залежей может варьироваться от 10^{10} до 10^{12} м^3 . К подобным оценкам надо относиться с достаточной степенью осторожности. Если объем выброса составляет 10^{12} м^3 , то масса выброса – 660 Мт (плотность метана $\rho_0 = 0.66 \text{ кг/м}^3$), что сравнимо с ежегодным поступлением метана в атмосферу Земли (согласно [IPCC, 2007] – примерно 600 Мт) и на порядок превышает оценку выброса метана из всех геологических источников (примерно 50 Мт [Etiope, 2004]). Залповый выброс даже 10% от этой массы был бы обнаружен при определении среднегодовой концентрации метана, так как время жизни метана в атмосфере 9–10 лет [Etiope, 2004], а точность определения средних концентраций – несколько процентов. Исходя из экспериментальных наблюдений и оценок, ограничимся изучением выбросов метана порядка 10^9 – 10^{10} м^3 газа.

Представленные ниже расчеты выполнены с использованием гипозвукового приближения уравнений Навье-Стокса [Затевахин и др., 1994; Хазинс, 2010] в 3D постановке с использованием Декартовой системы координат. Некоторые из приведенных численных экспериментов допускают упрощение постановки за счет осевой симметрии течения. Однако в связи с трудностями, возникшими при реализации граничных условий на оси симметрии, 3D-геометрия использовалась и в этом случае.

Результаты численного моделирования

Радиус струи в расчетах варьировался, но основное внимание уделим струе с радиусом 400 м. Выбор связан с тем, что один из расчетов всплытия метановых пузырей был проведен для сферического объема указанного радиуса. При этом верхняя граница воздушно-метанового облака достигла 10 км, то есть облако поднялось почти до тропопаузы (11 км). Согласно расчетам время всплытия метановых пузырей составляет несколько минут и слабо зависит от радиуса пузыря. Поэтому выберем в качестве характерного времени действия струи интервал в 10 минут.

Параметрами, определяющими динамику всплытия струи метана, являются средняя интенсивность истечения и горизонтальный размер источника. Расход массы определяется соотношением:

$$\dot{M} = \pi r_0^2 w_0 \rho_0,$$

где r_0 – радиус источника, w_0 – вертикальная скорость поступления метана, ρ_0 – плотность метана. В предположении, что в течение 10 минут выделится 10^9 м³ метана, расход массы составляет примерно 10^6 кг/с. Следовательно, скорость истечения в данных условиях около 3 м/с.

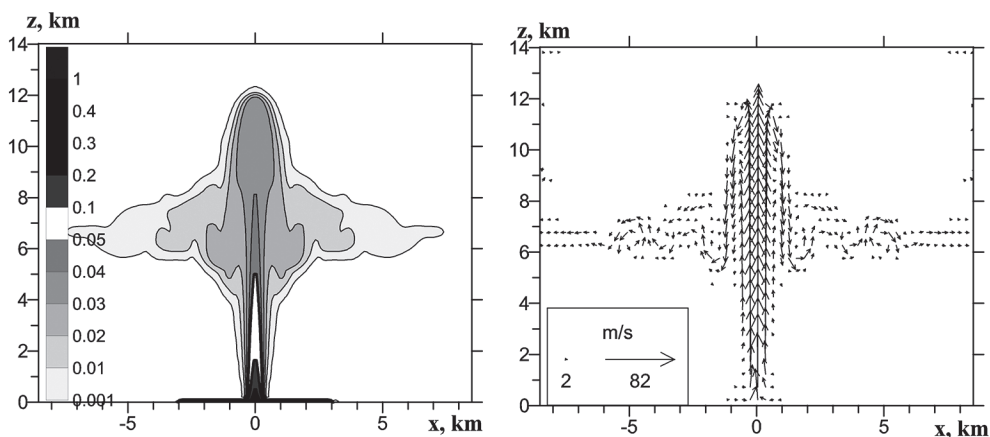


Рис. 1. Поля концентрации и скорости в сечении ZOХ на момент времени $t = 27.5$ мин

Из рис. 1 следует, что к моменту времени 27.5 мин, определяемому распространением возмущений к границам расчетной области, верхняя кромка струи метана с захваченным в процессе подъема воздухом достигла высоты 12 км, в то время как само облако локализовалось на высоте 6.5 ± 2 км. Газ в струе ускоряется от 3 до 80 м/с в вертикальном направлении, достигает верхней части центрального столба и оттуда вихревыми потоками перераспределяется в горизонтальную часть облака. Причем, как следует из расчетов, после процесса установления с характерным временем около 10 минут течение в центральном столбе практически стационарно, а горизонтальное облако не меняет своего положения, лишь увеличиваясь в размерах.

Вертикальная скорость w достигает почти максимальных значений на оси струи уже на высотах порядка 1 км, слабо изменяясь затем с увеличением высоты, а концентрация метана резко падает от значения 1 до примерно вдвое меньшего значения буквально на нескольких счетных интервалах (рис. 2, кривые 1).

Такое резкое изменение параметров у основания струи требует проверки точности расчетов. Однако в рамках трехмерной геометрии эта задача весьма проблематична. Поэтому проведен лишь один численный эксперимент, в котором шаг в вертикальном направлении, у основания струи, на нескольких десятках счетных интервалов был уменьшен вдвое. Отметим, что рис. 1 был получен в условиях, когда в большей части центрального столба и некоторой его окрестности использовался постоянный шаг по пространству и он составлял 50 м. К границам области шаг плавно увеличивался до 100 м. В уточненном расчете максимальная скорость струи несколько увеличилась, концентрация также увеличилась, но незначительно

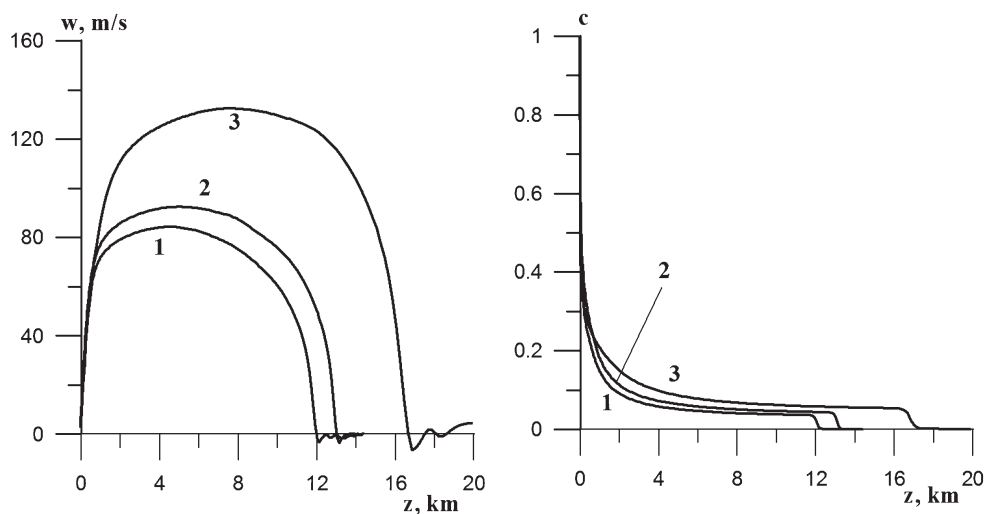


Рис. 2. Распределение скорости w и концентрации c вдоль вертикальной оси струи

(рис. 2, кривые 2). За счет больших вертикальных скоростей увеличивается и высота центральной колонны, положение которой определяется по обращению в ноль значений функций на рис. 2. Безусловно, одного расчета недостаточно для вывода о степени точности, но тенденция изменения параметров при исследовании на сходимость скорей всего сохранится. В этом смысле можно говорить, что в расчетах мы получаем значения, отличающиеся от точных в меньшую сторону.

Смесь метана с воздухом при нормальных условиях воспламеняется, если объемная доля содержания метана находится в пределах 5.3–15%, детонирует при его объемной доле 6.3–13% [Филин и Буланов, 1985]. На рис. 1 светлым тоном выделена конусовидная область, где концентрация метана лежит в пределах от 5 до 10%. Верхняя точка конуса находится на высоте ~5 км. В уточненном расчете эта точка поднялась до высоты примерно 7 км. В данном варианте зона возможного воспламенения оказалась относительно небольшой. Однако с увеличением разме-

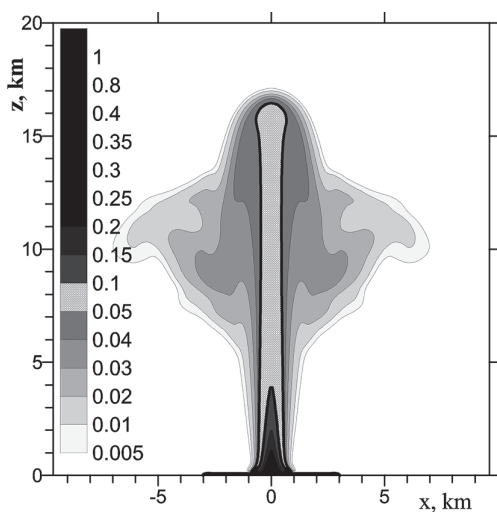


Рис. 3. Распределение концентрации в сечении ZOX для радиуса струи 1 км на момент времени $t = 15$ мин

ра струи все параметры растут и можно ожидать увеличения области воспламенения. На рис. 3 приведены результаты расчета аналогичной задачи, но с радиусом струи 1 км. В этом случае область с указанным диапазоном концентраций занимает цилиндр почти километровой радиуса в сечении и высотой 17 км. Соответствующие распределения скорости и концентрации вдоль вертикальной оси представлены на рис. 2 (кривые 3).

Таким образом, даже при относительно медленном истечении метана из достаточно мощного источника может формироваться протяженная зона с концентрацией метана достаточной для воспламенения.

Однако представленные расчеты проведены без учета влияния ветра, который существенным образом может изменить форму облака и распределение параметров в нем. Для учета влияния ветра были проведены два расчета развития струи с радиусом сечения 400 м в поле постоянного ветра умеренной интенсивности (10 м/с) и сильного ветра (20 м/с). Предполагалось, что вектор скорости ветра параллелен плоскости $Z = 0$ и направлен вдоль оси X .

В отличие от случая невозмущенной атмосферы, когда в силу осевой симметрии форму облака легко представить по единственному срезу, например, в плоскости ZOX , при наличии ветра течение имеет существенно трехмерный характер. Поэтому приведем изоповерхности концентрации, дающие общее представление о форме воздушно-метанового облака (рис. 4).

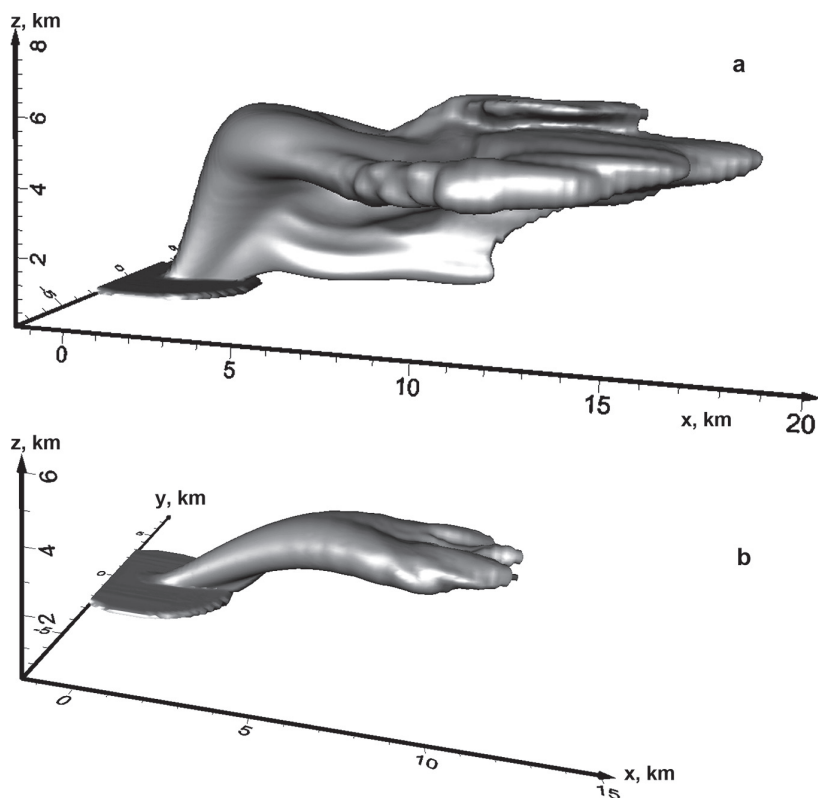


Рис. 4. Изоповерхности концентрации метана: **а** – скорость ветра 10 м/с, время – 20 минут, концентрация – 0.001; **б** – скорость ветра 20 м/с, время – 15 минут, концентрация – 0.005

Первое, что нужно отметить, это отсутствие характерного купола над основным облаком, формирующегося в случае невозмущенной ветрами атмосферы. В случае ветра умеренной интенсивности облако локализовано на высоте 4–6 км, то есть ниже, чем в случае невозмущенной атмосферы. Под облаком образуется тонкая по сравнению с радиусом струи пелена метана низкой концентрации, которая является следствием обтекания ветром центрального столба струи, а сам центральный столб оказывается наклоненным в направлении ветра, и угол наклона достигает 60° . При сильном ветре высота облака еще ниже – 2–4 км, а угол наклона центрального столба достигает 45° . На рис. 4, б пелена отсутствует, так как изоповерхность соответствует концентрации 0.005, а не 0.001, как на рис. 4, а. Это сделано специально, чтобы продемонстрировать уровень концентрации метана в области пелены.

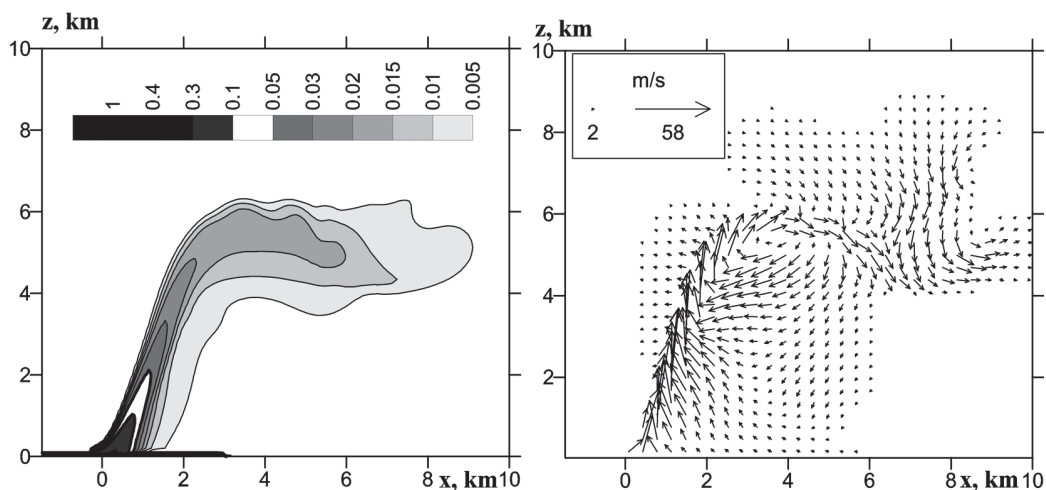


Рис. 5. Поля концентрации и скорости (в системе координат, связанной с ветром) в сечении ZOX на момент времени $t = 10$ мин; скорость ветра – 10 м/сек

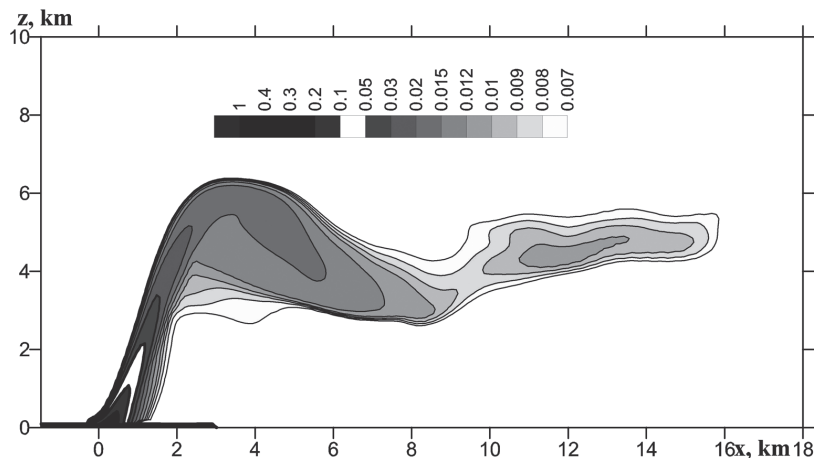


Рис. 6. Поле концентрации: скорость ветра – 10 м/сек, время – 20 мин

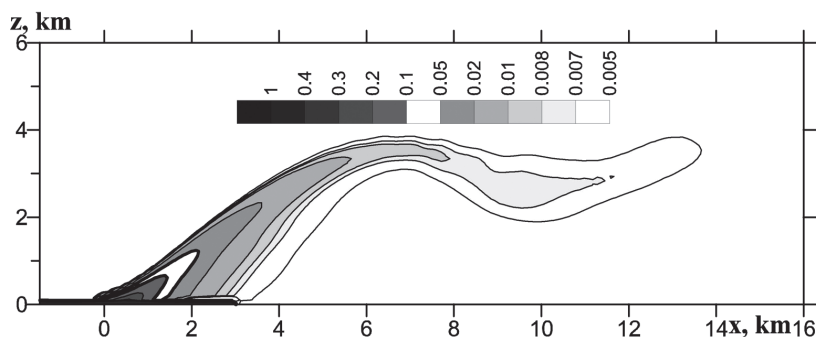


Рис. 7. Поле концентрации: скорость ветра – 20 м/сек, время – 15 мин

Внутренняя структура течения в случае скорости ветра 10 м/с представлена на рис. 5. Максимальные скорости упали с 80 до 60 м/с, с подветренной стороны наблюдается интенсивный подток воздуха в струю, который в верхней части наклонной колонны превращается в вихрь, порождающий вниз по потоку новые вихри, переносящие метан. Область струи, в которой метан способен к воспламенению, значительно уменьшилась в размерах.

В более поздний момент, 20 мин (рис. 6), поле концентраций в центральном столбе практически не изменяется, а облако совершает колебательные движения в вертикальном направлении. Аналогичными свойствами характеризуется и течение при скорости ветра 20 м/с (рис. 7).

Обсуждение результатов

Проведенные численные эксперименты продемонстрировали существенное влияние ветра на формирование облака из смеси метана и воздуха при струйном истечении метана из мощного геологического источника. В невозмущенной ветрами атмосфере газовая смесь быстро ускоряется под действием сил плавучести, формируя стационарный газовый столб, из верхней части которого газ «сливается» в горизонтальное облако. Несмотря на то, что верхняя кромка столба поднимается при заданных начальных данных даже выше тропопаузы, и, следовательно, выше, чем при всплытии метанового пузыря при сопоставимых условиях, само облако образуется на высотах 5–7 км, что, как и ожидалось, существенно ниже, чем в случае всплытия пузыря. Ветер несколько видоизменяет механизм переноса метана из струи в облако и картина течения становится более естественной. При этом ветер в значительной мере влияет на высоту всех облачных структур. Чем сильнее ветер, тем меньше высота.

Рассмотрены два значения скорости постоянного по времени и пространству ветра – 10 и 20 м/с. У поверхности Земли 10 м/с – достаточно сильный ветер, в то же время в верхней части тропосферы нередки ветра, скорость которых превышает 30 м/с. Поэтому выбранные значения следует рассматривать как некоторые характерные средние значения.

Метан – горючий, более того – взрывоопасный газ в некотором диапазоне концентраций метана и воздуха. Проведенные расчеты продемонстрировали, что с ростом размеров струи может образовываться протяженная в вертикальном направ-

лении область с параметрами, достаточными для воспламенения. С учетом ветра эта область может достаточно сильно отклоняться от вертикали. В связи с этим небезынтересно вспомнить не очень популярную версию метанового взрыва как источника Тунгусской катастрофы. По-видимому, варьируя параметры струи метана и силу ветра, можно подобрать условия, обеспечивающие детонационный режим горения наклонного столба метана высотой порядка 10 км, и получить, по крайней мере, близкий к наблюдаемому механический импульс на поверхности Земли в случае воспламенения струи каким-либо внешним источником. Однако вопрос о возможности подобного метанового выброса, который часто ассоциируют с жерлом палеовулкана Сибирских траппов, сформировавшихся на границе пермского и триасовых периодов около 250 млн лет назад, остается открытым. Никаких данных, свидетельствующих об активности метановых источников геологического происхождения этого региона, нет.

Работа выполнена в рамках программы № 8 ОНЗ РАН.

Литература

Etiope G. New directions: GEM – Geologic Emission of Methane, the missing source in the atmospheric methane budget // *Atmospheric Environment*. 2004. № 38. P. 3099–3100.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change / Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA. 2007.

Makogon Yu. F. Russia's contribution to the study of gas hydrates // *Natural Gas Hydrates* / Eds.: E.D Sloan, Jr. J. Happel, M.A. Hnatov. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1994. V. 715. P. 119–145.

Затевахин М.А., Кузнецов А.Е., Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Численное моделирование процесса всплытия системы высокотемпературных турбулентных термиков в неоднородной сжимаемой атмосфере // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 1. С. 44–56.

Филин Н.В., Буланов А.В. Жидкостные криогенные системы. Л.: Машиностроение, 1985. 247 с.

Хазинс В.М. Всплытие в атмосфере метана при импульсном выделении его из литосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42, № 4. С. 514–523.

Хазинс В.М. Метод крупных вихрей в задачах всплытия высокотемпературных термиков в стратифицированной атмосфере // *ТВТ*. 2010. Т. 48, № 3. С. 424–432.

Хазинс В.М. Моделирование медленных турбулентных течений в атмосфере, иницированных литосферными источниками возмущений // *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 93–100.

Хазинс В.М., Шувалов В.В. Моделирование струи метана, генерируемой разгрузкой мощного геологического источника / «Взаимодействие геосфер: Геофизические поля и массоперенос». Отчет о проведенных фундаментальных исследованиях за 2012 год по Программе 8 ОНЗ РАН. М: ИДГ РАН. 2012. Инв. № 19-2012. 107 с.