

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ С ОРОГРАФИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ В ВИДЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОНИЖЕНИЯ РЕЛЬЕФА

А.А. Спивак, В.М. Хазинс

Обсуждаются результаты численного моделирования аэродинамического режима воздушных потоков в приповерхностной зоне атмосферы Земли при наличии орографической неоднородности. Показано, что при определенных условиях в воздушном потоке формируются вихревые структуры, характер которых варьируется со временем. Приведены пространственные распределения как самих вихревых структур, так и концентрации возмущенных пылевых потоков. Результаты работы могут служить основой для оценки аэроэлектрических, электродного и других геофизических эффектов в приповерхностной атмосфере, а также при описании газодинамических процессов, сопровождающих вентиляцию карьеров при добыче полезных ископаемых открытым способом, в частности, с использованием взрывной технологии.

Введение

Значительный интерес к геофизическим эффектам в приповерхностной зоне Земли связан в первую очередь с необходимостью постоянного геоэкологического контроля среды обитания человека. Другой задачей является определение причин

и механизмов преобразования и взаимодействия геофизических полей разной природы, что важно, во-первых, при установлении закономерностей взаимодействия геосфер на границе литосферы и атмосферы, а во-вторых, при формулировке граничных условий, определяющих высотные профили геофизических полей. Особый интерес вызывают исследования электрического поля Земли, величина и вариация которых в значительной мере определяют жизнедеятельность живых организмов, работу электронных и высокоточных технических устройств, а также условия эксплуатации коммуникационных систем.

Наряду с космическими факторами и глобальными геофизическими процессами, например, глобальной грозовой активностью, на локальное электрическое поле в приземной атмосфере оказывают существенное влияние аэроионы и аэрозольные частицы, метеоусловия, нестационарные потоки воздушных масс, атмосферные фронты и т.д. В частности, вариации электрического поля Земли в зоне обмена (высоты до ~ 1 км) могут возникать в результате обтекания воздушными потоками орографических неоднородностей, что приводит к образованию в них вихревых структур [Адушкин и Спивак, 2014; Локтев и Спивак, 2015].

В настоящей работе рассматриваются результаты численного моделирования, описывающие аэродинамический режим воздушного потока, в том числе, содержащие пылевые частицы вблизи границы литосфера–атмосфера при наличии орографической неоднородности в виде локального понижения рельефа. Безусловно, в природе подобных неоднородностей неисчислимо множество. Поэтому при выборе размеров неоднородности мы ориентировались в первую очередь на структурные характеристики рельефа, который формируется в процессе открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Например, для карьеров железнорудной промышленности, для которых проблемы, связанные с геофизическими полями, актуальны, глубина карьеров достигает 200–600 м, ширина – 3–5 км.

Модель взаимодействия воздушного потока с неоднородностью рельефа

Рассмотрим задачу определения параметров воздушного потока при обтекании орографической неоднородности. Будем считать, что неоднородность земного рельефа представляет собой каньон, протяженность которого столь велика, что возмущения с краев каньона не достигают какого-либо заранее выбранного поперечного сечения за все время расчета. Полагаем, что однородный воздушный поток направлен вдоль земной поверхности перпендикулярно оси каньона. Задачу будем решать в двумерном приближении. Развитие течения в стратифицированной атмосфере исследовано путем численного решения уравнений Навье–Стокса для гипозвуковых течений с турбулентной вязкостью, моделируемой методом крупных вихрей [Хазинс, 2010]. Ранее с помощью этой методики был исследован ряд близких по постановке задач в условиях выпуклого рельефа [Хазинс и Шувалов, 2011; Хазинс, 2012]. Пыль будем рассматривать как пассивную примесь, а ее перераспределение в пространстве рассчитывать с помощью уравнения переноса при постоянном числе Шмидта. Для определенности сечение каньона представим в виде перевернутой трапеции, верхняя сторона которой ~ 5 км, высота 600 м. При численных расчетах длина нижней стороны трапеции варьировалась от 1 км (пологие борта) до 3 км (крутые борта).

Ограничимся случаем ветра умеренной интенсивности (10 м/с). На рис. 1 представлен характер течения в один из моментов времени в области, включающей в

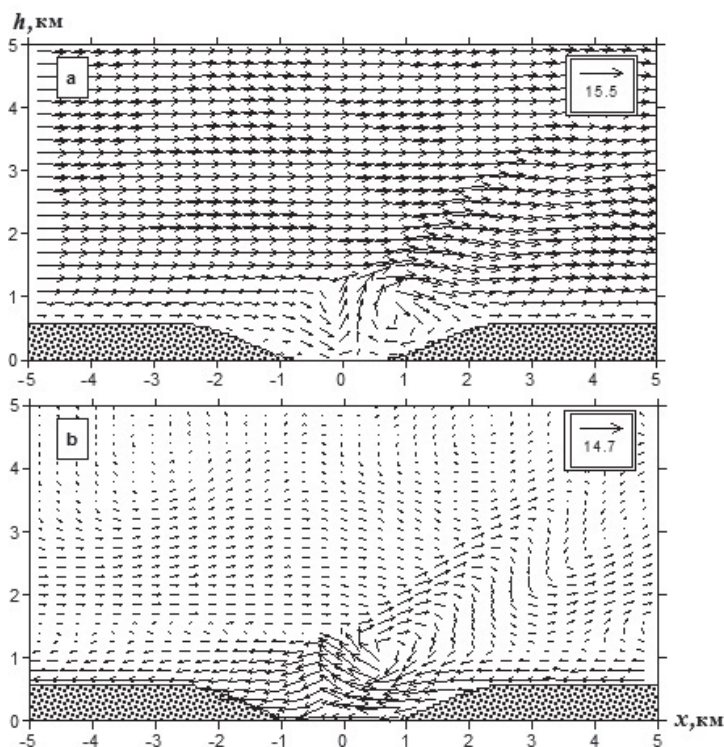


Рис. 1. Поле скоростей в воздушном потоке через 2,5 часа после начала взаимодействия ветра с орографической неоднородностью (длина стрелки соответствует указанному значению скорости в м/с).

a – в неподвижной системе координат; b – в системе координат, связанной с ветром

себя сам каньон с пологими бортами и прилегающую к нему часть атмосферы. Отметим, что численное моделирование выполнено в области, размеры которой достигают десятка километров в вертикальном направлении и несколько десятков километров в горизонтальном, что позволяет избежать влияния граничных условий. Существенное превышение горизонтальной составляющей скорости потока над вертикальной в большей части области течения не позволяет выявить детали процесса. По этой причине поле скорости в один и тот же момент времени представлено на рис. 1 как в неподвижной системе координат (рис. 1, a), так и в системе координат, связанной с ветром (рис. 1, b). В последнем случае из горизонтальной составляющей вектора скорости вычтена величина, равная скорости ветра. Из рис. 1 видно, что в результате взаимодействия потока с границами каньона внутри него формируется вихревое течение, которое в рассматриваемый момент времени способно выносить воздух из каньона вверх, где он подхватывается ветровым потоком. Отметим, что на горизонтальных участках поверхности Земли и на бортах каньона реализуется так называемое условие прилипания (вертикальная и горизонтальные составляющие скорости на этих границах равны нулю), имитирующие торможение потока у поверхности Земли. Следствием этого торможения является формирование приземного пограничного слоя, толщина которого определяется высотой, на которой горизонтальная скорость достигает скорости набегающе-

го потока. Видно (рис. 1, b), что при выбранном шаге численного интегрирования вблизи левой границы представленного фрагмента течения (то есть в набегающем потоке), высота погранслоя над поверхностью (область, где скорости достигают скорости набегающего потока, или обращаются в нуль в системе координат, связанной с ветром) достигает 1 км, что удовлетворительно согласуется с представлениями о толщине погранслоя.

Динамика течения внутри орографической неоднородности

Ограничимся рассмотрением характеристик течения, развивающегося внутри каньона. На рис. 2 приведены поля скорости для случая каньона с пологими бортами в период с 1 до 4 часов после начала взаимодействия ветра с полостью. Из

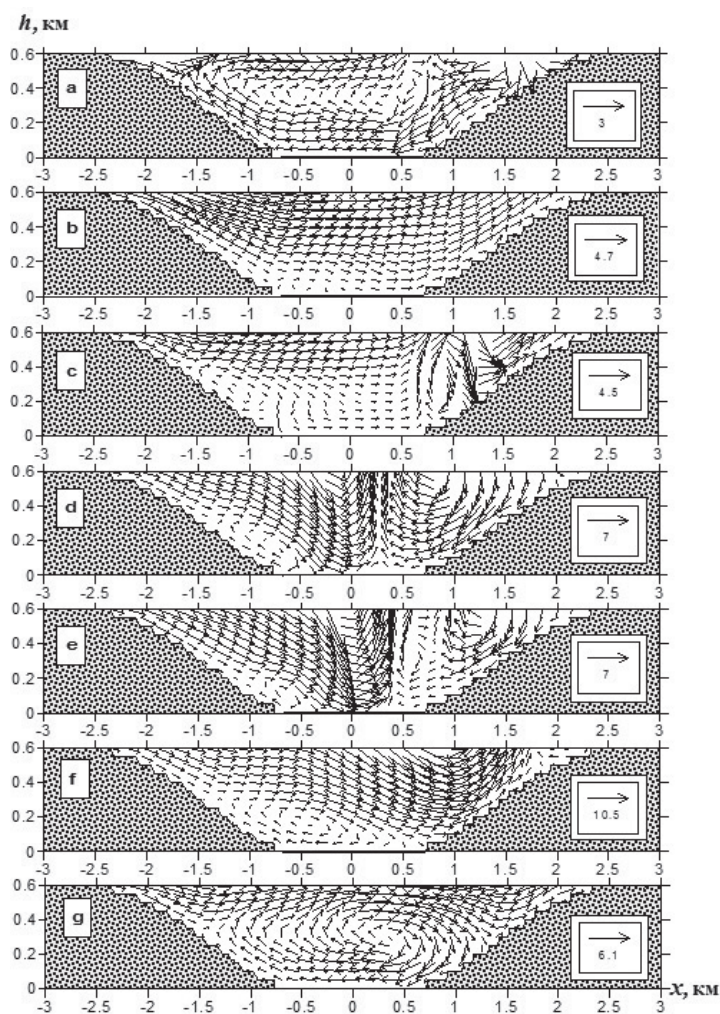


Рис. 2. Вихревой поток в каньоне с пологими бортами.
Панели а, b, с, d, е, f и g соответствуют моментам времени 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 и 4 часа

рис. 2 видно, что примерно через 1 час после начала расчета в каньоне образовался вихрь, заполняющий все пространство каньона (рис. 2, а), который разрушается примерно через полчаса и поток втекает и вытекает без внутренних завихрений (рис. 2, б). Еще через полчаса формируется новый вихрь у правого борта (рис. 2, с), который расширяется внутрь каньона с образованием вертикальной струи примерно в его середине (рис. 2, d, e). Следующий фрагмент (рис. 2, f) качественно схож с рис. 2, б, а рис. 2, g с рис. 2, а. Вполне возможно, что вихревые структуры в последующем будут повторять друг друга или образовывать новые, что демонстрирует отсутствие выхода течения на стационар.

Наблюдающиеся на рис. 2 ступеньки на бортах каньона связаны с описанием гладкой линии на прямоугольной сетке. Их размеры зависят от выбора пространственного шага интегрирования уравнений, который в рассматриваемом случае в обоих направлениях составляет 50 м. В каком-то смысле эти ступеньки имитируют горизонтальные слои – уступы, создаваемые в реальных карьерах для движения техники. Для сравнения был проведен аналогичный расчет с шагом 25 м, который не выявил существенных отличий в описании течения.

На рис. 3 отображен характер течения внутри каньона для случая крутых бортов (верхний размер каньона составляет 5, нижний – 3 км). Шаг интегрирования – 25 м. Видно, что развивающееся течение характеризуется распространением внутри каньона вихрей, которые, ввиду увеличившегося пространства каньона, имеют хорошо выраженный вид. Через час от начала расчета вблизи правого борта каньо-

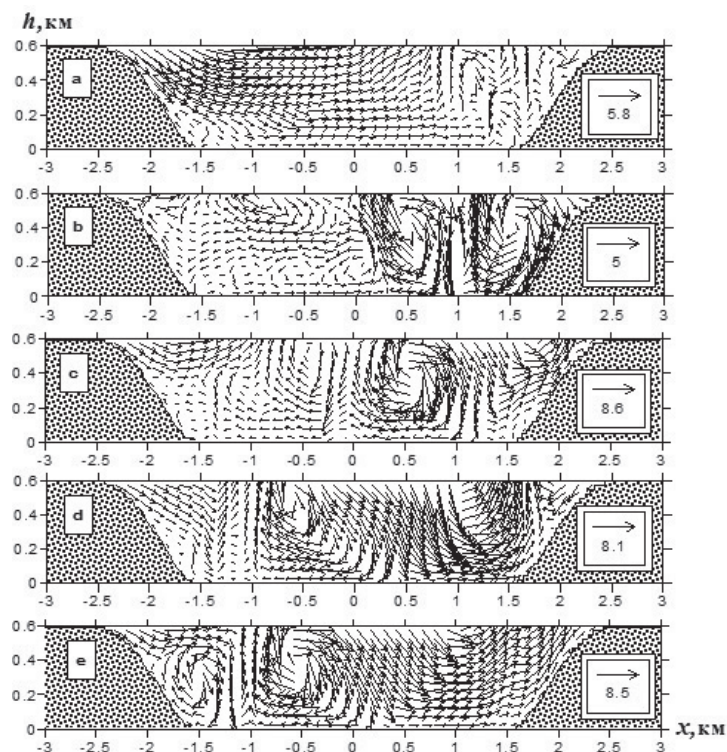


Рис. 3. Вихревой поток в каньоне с крутыми бортами.
Панели а, б, с, d и е соответствуют моментам времени 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 часа

на формируется вихрь (рис. 3, а), который смещается к левому борту (рис. 3, b, c), отражается от него (рис. 3, d), в результате чего у левого борта формируются два противоположно направленных вихря (рис. 3, e). При этом следует отметить, что на масштабе времени в несколько часов выход на стационар также не наблюдается.

Таким образом, взаимодействие ветрового потока с областью внутри каньона в рамках рассматриваемой задачи характеризуется развитием сложного вихревого течения во внутренней области каньона и на рассмотренных масштабах времени течение непрерывно меняется.

Динамика насыщающих каньон пылевых включений

Известно, что концентрация пыли оказывает существенное влияние на напряженность электрического поля в приповерхностной атмосфере [Адушкин, Соловьев, 1994]. По этой причине в условиях задачи, рассмотренной в предыдущем параграфе, была исследована динамика развития пылевого облака при выдувании ветром насыщенного пылью воздуха из каньона. Здесь также уместно отметить,

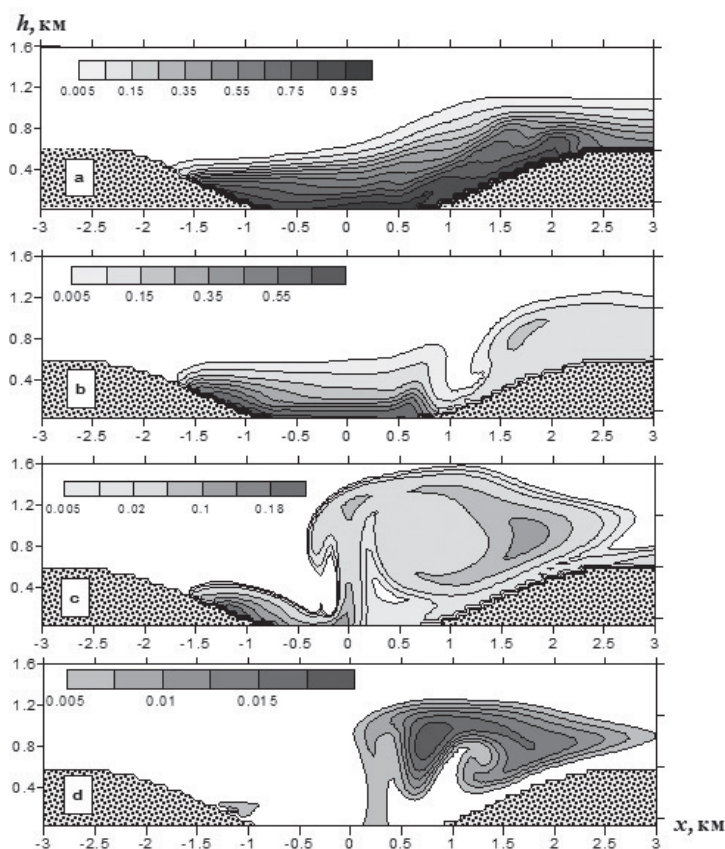


Рис. 4. Распределение концентрации пыли в каньоне с пологими бортами в различные моменты времени. Панели а, b, c и d соответствуют моментам времени 1; 1,5; 2; 2,5 и 3, часа

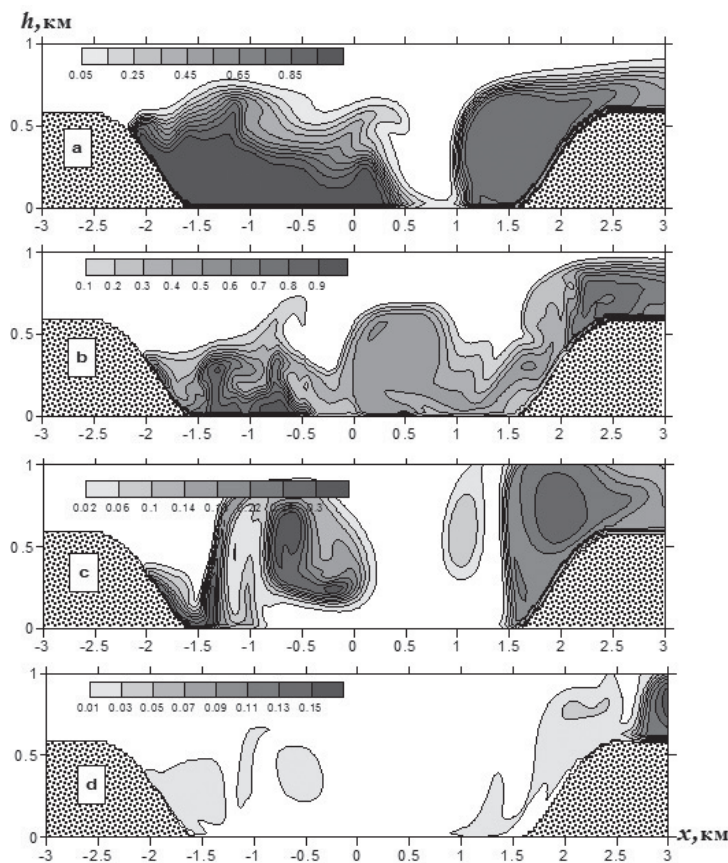


Рис. 5. Распределение концентрации пыли в каньоне с крутыми бортами в различные моменты времени.

Панели а, b, c и d соответствуют моментам времени 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 часа

что такая задача имеет отношение к задаче проветривания карьеров при открытой разработке полезных ископаемых [Конорев, Нестеренко, 2012]. Пусть в какой-то момент времени обтекаемая ветром полость каньона равномерно заполняется пылью. Будем считать, что время выброса пыли соответствует какому-либо моменту времени, когда взаимодействие ветра с полостью каньона уже не зависит от начальных условий (анализ решения показывает, что для этого достаточно, чтобы время превышало 1 час с момента начала расчета). Концентрацию пыли будем рассматривать в относительных долях от начальной концентрации, которую примем за единицу.

Рассмотрим эволюцию пыли для случая, когда выброс произошел в момент времени $t = 1$ час в каньоне с пологими бортами (рис. 4). Как следует из рис. 4, вначале пыль выносится из верхней части каньона (рис. 4, а, b), а затем в результате развития вертикальной струи в процессе взаимодействия вихрей формируется пылевой фонтан (рис. 4, d, e), который сносится ветром за пределы каньона. Время очистки каньона от пыли в рассматриваемых условиях составляет примерно 2 часа.

Более сложно развивается процесс формирования пылевого облака в случае крутых бортов каньона (рис. 5). Пылевой слой разрывается на две части, каждая из ко-

торых выносятся из каньона независимо друг от друга. Однако и в этом случае время очистки каньона от пыли примерно 2 часа.

Заключение

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что взаимодействие воздушных потоков с орографическими неоднородностями, характеризующимися пониженным рельефом, приводит к возникновению и взаимодействию интенсивных вихрей внутри полости, а также формированию области завихренного потока в приповерхностной зоне. При этом процесс характеризуется возникновением повторяющихся структур и существенно не стационарен (за достаточно продолжительное время расчета достичь стационарного режима не удалось).

Характер течения, развивающийся в полости неоднородности, определяет поведение мелкодисперсной пыли, если пыль в силу каких-либо естественных или искусственно созданных причин в какой-то момент времени заполняет орографическую неоднородность. Подхватываясь вихрями, пыль постепенно удаляется из каньона, и время очищения каньона при выбранных начальных данных достигает примерно двух часов. Отметим, что, если бы каньона не было и пыль была бы сосредоточена у поверхности, то за 2 часа при скорости ветра 10 м/с пыль была бы перенесена на расстояние примерно 70 км от места начальной локализации, где отмечались бы вариации электрического поля.

Литература

Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.

Адушкин В.В., Соловьев С.П. О методе расчета пылевого загрязнения атмосферы по измерениям напряженности электрического поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1994. № 4. С. 80–88.

Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф. Оценка состояния и перспективы применения систем вентиляции и пылегазоподавления на карьерах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 113–120.

Локтев Д.Н., Спивак А.А. Синхронизм вариаций геофизических полей в приповерхностной зоне Земли / Триггерные эффекты в геосистемах: материалы III Всероссийской конференции, Москва, 16-19 июня 2015 г. М.: ГЕОС, 2015 (в печати).

Хазинс В.М. Метод крупных вихрей в задачах всплытия высокотемпературных термик в стратифицированной атмосфере // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 3. С. 424–432.

Хазинс В.М., Шувалов В.В. Моделирование пылевых потоков в тропосфере // Динамика физических полей Земли. М.: Светоч Плюс. 2011. С. 237–249.

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