

Научная статья
УДК 622.4+519.67
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.002

К ВОПРОСУ О ВЗАИМОСВЯЗИ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ КОТЛОВИН И КАРЬЕРОВ СО СТЕПЕНЬЮ УСТОЙЧИВОСТИ АТМОСФЕРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

Павел Васильевич Амосов^{1,2}, Александр Анатольевич Бакланов^{2,3}

¹Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Всемирная метеорологическая организация, Женева, Швейцария

¹p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

^{2,3}aabaklanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Аннотация

На основе короткого обзора российских и зарубежных исследований отмечена необходимость выполнения изысканий по разработке стратегий сокращения загрязнения атмосферы в горнодобывающих карьерах и населённых пунктах, расположенных в районах со сложной орографией (горные цирки, котловины). В данной работе, продолжающей серию исследований, на примере карьеров, как аналогов горных котловин, методом численного моделирования исследована конкретная задача естественного проветривания в зависимости от фоновой атмосферной стратификации. Компьютерные модели созданы в неспециализированном программном коде COMSOL. В численных экспериментах рассмотрены различные условия атмосферной стратификации: параметр фоновой стратификации проварьирован от 0,0 до +0,025 °С/м с шагом 0,005 °С/м. Показано, что результаты аэродинамических расчётов, выполненные на базе построенных компьютерных моделей для условий нейтральной стратификации, демонстрируют строгое соответствие схемам проветривания по классификации классиков аэрологии карьеров В. С. Никитина и Н. З. Битколова. Спрогнозирована существенная перестройка структуры воздушных потоков и перевод прямоточной и рециркуляционно-прямоточной схем проветривания в рециркуляционную при учёте механизмов плавучести и фоновой стратификации. Показано «растягивание» зоны рециркуляции и её простираание практически вдоль всей подошвы карьера при усилении инверсионного состояния. При больших значениях углов откоса карьера продемонстрировано послойное выстраивание потоков противоположного направления. Спрогнозирован рост времени естественного проветривания по сравнению с нейтральным состоянием атмосферы в 2–3 раза с усилением инверсионного состояния атмосферы.

Ключевые слова:

загрязнение атмосферы, горные котловины, неглубокие карьеры, схемы естественного проветривания, механизмы плавучести и фоновой стратификации, инверсия, численное моделирование.

Благодарности:

работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1023032200038-4 «Трансформация природных и техногенных систем в условиях перехода к низкоуглеродному развитию экономики и изменяющегося климата Арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области)». Часть исследований выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-30008.

Для цитирования:

Амосов П. В., Бакланов А. А. К вопросу о взаимосвязи естественного проветривания горных котловин и карьеров со степенью устойчивости атмосферной стратификации // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 14–32. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.002.

Scientific article

ON THE RELATIONSHIP OF NATURAL VENTILATION OF MOUNTAIN BASINS AND OPEN-PITS WITH THE DEGREE OF STABILITY OF ATMOSPHERIC STRATIFICATION

Pavel V. Amosov^{1,2}, Alexander A. Baklanov^{2,3}

¹Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Sankt-Petersburg, Russia

³World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

¹p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

^{2,3}aabaklanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Abstract

Based on a short review of Russian and foreign studies, the need to carry out research on the development of strategies for reducing atmospheric pollution in settlements located in areas with complex orography (mountain circuses, basins) is noted. Continuing the series of studies in this paper, using the example of shallow open-pits as analogues of mountain basins, a specific problem of natural ventilation depending on background atmospheric stratification is investigated by numerical modeling. Computer models are created in a non-specialized COMSOL program code. Various atmospheric stratification conditions are considered in numerical experiments: the background stratification parameter is varied from 0.0 to +0.025 °C/m in increments of 0.005 °C/m.

It is shown that the results of aerodynamic calculations performed on the basis of constructed computer models for neutral stratification conditions demonstrate strict compliance with the ventilation schemes according to the classification of the classics of aerology of the V. S. Nikitin and N. Z. Bitkolov open-pits.

A significant restructuring of the structure of air flows and the transfer of direct-flow and recirculation-direct-flow ventilation schemes to recirculation is predicted, taking into account the mechanisms of buoyancy and background stratification. The "stretching" of the recirculation zone and its extension along almost the entire sole of the open-pit with an increase in the inversion state is shown. At large values of the slope angles of the open-pit, the layered alignment of flows in the opposite direction is demonstrated. An increase in the ventilation time of open-pits in comparison with the neutral state of the atmosphere is predicted by 2–3 times with an increase in the inversion state of the atmosphere.

Keywords:

atmospheric pollution, mountain basins, shallow open-pits, natural ventilation schemes, buoyancy and background stratification mechanisms, inversion, numerical modelling

Acknowledgements:

The research was carried out within the framework of the research topic No. 1023032200038-4 "Transformation of natural and man-made systems in the context of the transition to low-carbon economic development and the changing climate of the Arctic zone of the Russian Federation (using the example of the Murmansk Region)". Part of the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-77-30008.

For citation:

Amosov P. V., Baklanov A. A. On the relationship of natural ventilation of mountain basins and open-pits with the degree of stability of atmospheric stratification // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3. P. 14–32. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.002.

Введение

Известно, что рельеф может оказывать значительное влияние на степень загрязнения атмосферы [1, 2]. Различные формы местности могут как усиливать, так и снижать концентрацию вредных веществ в воздухе.

Одной из основных причин такого влияния является ветровой и турбулентный перенос. Рельеф может изменять направление и интенсивность ветра, что непосредственно влияет на рассеивание загрязняющих веществ. Ветер, проходя через ущелья, горные котловины или цирки, может усиливать концентрацию загрязняющих веществ или задерживать их в определённых локальных областях, что приводит к более высокому уровню загрязнения воздуха.

Другой важный фактор влияния рельефа на загрязнение воздуха связан с образованием температурной инверсии, значительно снижающей ветровой и турбулентный воздухообмен, что приводит к накоплению загрязняющих веществ внутри горных котловин и цирков.

Исследования влияния рельефа на качество воздуха имеют значительное практическое значение для разработки стратегий по сокращению загрязнения атмосферы и улучшению качества воздуха в городах и населённых пунктах, расположенных в районах со сложной орографией, например в горных цирках и котловинах [3, 4].

Степень загрязнения воздуха промышленностью зависит не только от специфики предприятий и их мощности, но и от уровня урбанизированности населённого пункта, а также от климатических условий, определяющих потенциал загрязнения атмосферы [5]. В качестве примера влияния природных факторов на экологию авторы обзора по промышленному загрязнению [5] приводят Кузбасс. Загрязнение воздуха представляет особенно сильную опасность в межгорных котловинах Восточной Сибири. Чрезмерно высокая концентрация промышленных предприятий в Кузбассе в условиях замкнутости котловинного рельефа и преобладания антициклонального типа погоды (штили и устойчивая стратификация пограничного и приземного слоёв атмосферы) создаёт крайне сложные

условия для жизни людей. Помимо отрицательного природного фона, усилению экологического неблагополучия региона способствуют горнодобывающая промышленность [6] и высокоплотная застройка.

Другим наглядным примером является Красноярск. У истоков экологического бедствия в Красноярске, по мнению авторов сайта [7], стоит его географическое положение. Город разместился прямо в котловине, огибаемой хребтами Саянских гор, плохо проветривается приземная атмосферная среда. По мере застройки высотными зданиями продуваемость в городе становится всё ниже и ниже. Ряд экспертов полагает, что загруженность Красноярска высотками, особенно на берегу Енисея, как раз-таки и поспособствовала возникновению неблагоприятных метеорологических условий.

В работах А. П. Щербатюка [8, 9] отмечено появление повышенных концентраций загрязняющих веществ в воздушной среде городов, расположенных в условиях межгорных котловин Забайкалья. Указывается, что в таких районах источниками загрязняющих веществ являются выбросы от промышленности и автотранспорта, подчёркивается актуальность проблематики техногенного загрязнения атмосферного воздуха городов в целом и особенно городов, расположенных внутри горных регионов различных стран [10, 11] (рис. 1).

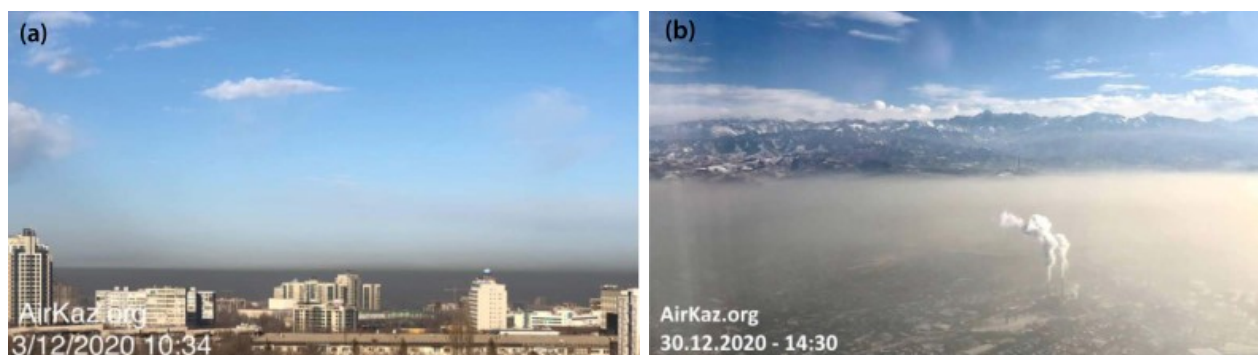


Рис. 1. Загрязнение воздуха Алматы в инверсионном слое, блокирующем вертикальный обмен:

a — утренний смог в северной части города; *b* — дневной смог покрывает весь город [11]

Fig. 1. Almaty air pollution in the inversion layer blocking vertical exchange:

a — morning smog in the northern part of the city; *b* — daytime smog covers the entire city [11]

Присутствие значительного количества техногенных загрязнителей, в частности, фиксируется в городах Кавказа [12], Малоазиатского нагорья [13]. В пределах Внутренней Азии воздействие загрязнителей на атмосферный воздух стало серьёзной проблемой для крупных городов Китая [14, 15] и малонаселённых районов Кыргызстана [16].

Продолжительные температурные инверсии наблюдаются зимой в горной части бассейна р. Молдова, на севере Румынии [17]. Сильное загрязнение атмосферного воздуха в период с декабря по март фиксируется на территории Улан-Батора в Монголии, расположенного в котловине Урга, которая характеризуется резко континентальным климатом с большими суточными и годовыми колебаниями температуры и устойчивыми зимними инверсиями [18].

Для прогноза распределения загрязнений в котловинах, адаптации населения к такой неблагоприятной ситуации и рационального размещения крупных промышленных объектов [8, 9] разрабатываются математические модели различной сложности и полноты.

В публикации сотрудников Иркутского государственного университета [19] рассматривается проблема загрязнения атмосферного воздуха Байкальской котловины. На основе математической модели строятся области распространения загрязняющих веществ, поступающих от стационарных источников, расположенных в котловине. Оценивается антропогенное влияние на особо охраняемые природные территории.

Диссертационная работа И. Г. Гранберга [20] посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию физических механизмов процессов аэрозольного загрязнения атмосферного пограничного слоя над неоднородными поверхностями, а также изучению влияния вызванных ими

экологических проблем на здоровье населения. На основе созданной численной модели слабо сжимаемой расслоенной адиабатической жидкости И. Г. Гранберг решил актуальные задачи переноса загрязнений от крупных электростанций над территориями Израиля и Кипра [21]. Рассмотренные в публикации [21] задачи необходимы для разработки предложений об оптимальных с экологической точки зрения мест расположения источников атмосферных загрязнений.

С использованием численной мезомасштабной модели атмосферного пограничного слоя для типичных метеорологических условий сотрудники СО РАН провели исследование динамики воздушных потоков и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине [22, 23]. Методами гидродинамического моделирования атмосферной циркуляции авторами выполнен анализ процессов переноса и трансформации загрязняющих примесей в атмосфере в районе Норильска.

Известно большое количество специализированных CFD-моделей аэротермодинамики и переноса загрязнений в атмосфере. Например, на сайте Университета в г. Гамбурге содержится актуальная (май 2022 г.) база данных (более сотни) программных продуктов, разработанная в рамках проекта COST728 “Enhancing Meso-scale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications” [24]. Авторы проекта классифицировали эти программы как по пространственному масштабу, так и по областям приложения кодов.

Практика свидетельствует, что используются доступные ресурсы: либо собственные программы, либо неспециализированные (коммерческие) программные коды, настраиваемые под конкретные задачи.

Многие исследовательские группы разрабатывают собственные компьютерные программы и модели, например: группа учёных Тульского государственного университета под руководством Н. М. Качурина изучала процессы переноса загрязнений на объектах горной промышленности на базе численного моделирования [25]; сотрудники Института динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН (В. М. Хазинс с коллегами) разработали эйлерову модель, предназначенную для моделирования начальной стадии образования и подъёма пылевого облака [26]; томские специалисты (Р. Б. Нутерман, А. В. Старченко и др.) выполнили значительный объём исследований по разработке математической модели аэродинамики и переноса примеси от выбросов автотранспорта в элементах городской застройки, изучали структуры течений над взлётно-посадочной полосой аэропорта и др. [27, 28]; сотрудники факультета геофизики Университета Сантьяго де Чили [29] изучали проблему циркуляции воздуха внутри крупных карьеров при интенсивной инсоляции, в которых преобладают механические и плавучие эффекты (имеют решающее значение при изучении рассеивания загрязняющих веществ внутри и снаружи карьера) с использованием ранее разработанного решателя OpenFOAM.

Отметим работы И. Н. Эсау с коллегами [30, 31], например, в статье [30] представлен анализ взаимодействия между топографически принудительной рециркуляцией крупномасштабного потока над урбанизированной прибрежной долиной и местной циркуляцией, подобной бризу, на базе численных экспериментов по моделированию больших вихрей (LES) с использованием модели PALM, чтобы учесть реалистичную топографию окружающих город гор. В работе [31] с помощью имитационной модели больших вихрей, основанной на местных измерениях, представлена оценка качества воздуха с очень высоким разрешением. Эта полностью трёхмерная гидродинамическая модель с примитивными уравнениями учитывает и структурные детали сложной городской поверхности, и турбулентные вихри размером более 10 м.

Заметим, что в настоящее время указанная программа PALM (передовая система метеорологического моделирования потоков в пограничном слое атмосферы и океана) дополнена замыканием турбулентности, основанным на усреднённых по Рейнольдсу уравнениях Навье — Стокса (RANS). Таким образом, PALM может работать не только в режиме разрешения крупномасштабной турбулентности (LES), но и в режиме RANS, в котором параметризуется весь спектр турбулентности.

В публикации [32] при помощи LES-модели проведены расчёты устойчиво-стратифицированных турбулентных течений над поверхностями с явно заданными элементами шероховатости. Предложена параметризация для масштаба турбулентности, позволяющая аппроксимировать средние профили скорости и температуры. В статье [33] приведены результаты анализа данных численного моделирования устойчиво-стратифицированных турбулентных течений

Куэтта при различных значениях числа Ричардсона. Используются две различные технологии: прямое численное моделирование и моделирование методом крупных вихрей. Показано, что течения, наряду с хаотической турбулентностью, независимо от метода расчёта содержат крупные организованные структуры. В поле температуры эти структуры проявляются как наклонные слои жидкости со слабоустойчивой стратификацией, разделённые очень тонкими слоями с большими градиентами температуры. Существование подобных слоистых структур в природе косвенно подтверждается анализом данных натурных измерений на метеорологической мачте.

В центре внимания авторов представленной публикации находятся своего рода аналоги (в уменьшенном, а порой и в равном масштабе) указанных выше природных объектов, а именно горные карьеры. Действительно, карьеры вполне можно рассматривать как искусственно созданные человеком прообразы горных котловин и цирков, тем более что в центре внимания авторов находится не динамика формирования фоновой инверсии и теплового баланса в атмосфере карьера, а процессы загрязнения атмосферы в условиях установившейся фоновой инверсии.

В процессе добычи полезных ископаемых периодически производят массовые взрывы, что приводит к загрязнению атмосферы карьеров и необходимости их проветривания, также используется оборудование с ДВС (мощные экскаваторы, самосвалы), что тоже обуславливает поступление в атмосферу загрязняющих веществ.

На текущем этапе исследований остановимся на взаимосвязи естественного проветривания карьеров при массовых взрывах со степенью устойчивости атмосферной стратификации.

Постановка задачи

В соответствии с классической работой В. С. Никитина и Н. З. Битколова [34, с. 33–35 и табл. III.1] различают четыре схемы проветривания карьеров, которые классифицируются через геометрические параметры карьеров (рис. 2).

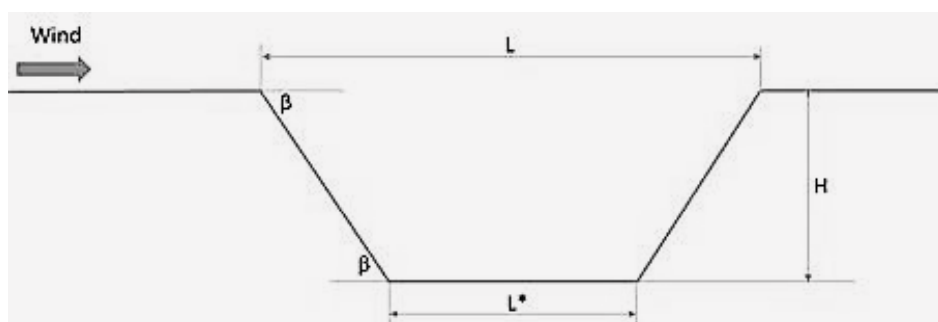


Рис. 2. Примерная схема карьера с геометрическими параметрами, определяющими схемы проветривания (L — длина карьера в направлении движения ветра; H — глубина карьера; β — угол откоса борта карьера; L^* — размер подошвы (дна) карьера)

Fig. 2. Approximate scheme of the quarry with geometric parameters defining ventilation schemes (L is the length of the quarry in the direction of wind movement; H is the depth of the quarry; β is the angle of slope of the side of the quarry; L^* is the size of the sole (bottom) of the quarry)

Пока оставим без внимания прямоточно-рециркуляционную схему проветривания, которая требует рассмотрения разных углов откосов для групп верхних и нижних уступов. Остальные схемы проветривания определяются через три параметра (рис. 2): L — длина карьера в направлении движения ветра; H — глубина карьера; β — угол откоса борта карьера; L^* — размер подошвы (дна) карьера.

Напомним эти схемы:

- рециркуляционная — при $L/H < 5-6$ и $\beta > 15^\circ$;
- рециркуляционно-прямоточная — при $L/H > 8-10$ и $\beta > 15^\circ$;
- прямоточная — при любых значениях L и H , но $\beta \leq 15^\circ$ и равномерной отработке уступов подветренного борта.

Если проварьировать указанные на рис. 2 параметры (L^* — от 100 до 500 м; β — от 10° до 80° ; H — от 100 до 700 м), то с использованием простейших тригонометрических соотношений несложно показать следующее: чтобы иметь возможность одновременно моделировать все три режима проветривания, следует рассматривать неглубокие карьеры (100–200 м) с размерами подошвы 400–500 м.

При создании геометрической модели карьера в программе COMSOL [35, 36] пространственный шаг сетки построения (не расчётной) по осям X и Y принят равным 25 м. Высота уступов принята равной указанному размеру, ширина рабочей (транспортной) горизонтальной площадки соответствует выбранному углу откоса. Остальные геометрические параметры модели карьера приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые параметры модели при фиксированных H (150 м) и L^* (500 м)
Variable model parameters at fixed H (150 m) and L^* (500 m)

№ п/п	Угол откоса борта карьера β	Длина карьера L , м	L/H	Схема проветривания по [34, с. 33–35]
1	~10,6	2100	14	Прямоточная
2	~20,6	1300	8,7	Рециркуляционно-прямоточная
3	~31,0	1000	6,7	Практически рециркуляционная
4	45,0	800	5,3	Рециркуляционная
5	~56,3	700	4,7	То же
6	~63,4	650	4,3	«

Цель исследования — на базе метода численного моделирования изучить процесс проветривания карьеров, классифицируемых при проведении взрывных работ по различным схемам проветривания, с учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации.

На текущем этапе не ставилась задача построения полноценной научной модели, интересен был анализ механизмов проветривания карьеров/котловин в условиях Севере, где продолжительные устойчивые стратификации атмосферы существенно меняют картину. По этой причине авторами использована описанная ниже упрощённая модель, позволяющая отследить эффект указанных в цели исследования механизмов.

Для выполнения численных экспериментов под обозначенную цель исследований в программе COMSOL построены шесть вариантов геометрий карьеров с основными геометрическими параметрами (см. табл. 1). Численная модель, включающая физику процессов с учётом механизмов плавучести и атмосферной стратификации и набором краевых условий, подробно изложена в публикации авторов [37], в которой дан обзор литературных источников по применению неспециализированных программных продуктов (ANSYS, COMSOL, FLOWVISION) к исследованиям в рудничной аэрологии и процессов пыления на объектах горнопромышленного комплекса. Применительно к изучению процессов проветривания карьеров были отмечены публикации специалистов учебных, научных и промышленных организаций [38–47].

Коротко напомним основные положения используемой математической модели.

Основные уравнения модели и краевые условия

Система основных уравнений аэротермодинамики и переноса загрязнений в объёмной постановке представлена авторами в статье [37]. Здесь же приведём систему уравнений в двухмерной постановке (координаты $X-Z$), которая реализована в данном исследовании, используя обозначения и терминологию программы COMSOL [35, 36]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad (1a)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho \lambda g'; \quad (16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \vartheta'}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} + \rho C_p w \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} = -\rho C_p S w + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} \right); \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_T P(\vec{u}) \cdot \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon; \quad (4a)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{C_{\varepsilon 1} \eta_T P(\vec{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (4b)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_c \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (5)$$

где t — время; u, w — компоненты вектора скорости $\vec{u}$ потоков в направлении осей x, z соответственно; ρ — плотность воздуха; C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; ϑ' — отклонение потенциальной температуры от фоновой; π — приведённое давление; λ — параметр конвекции (плавучести) ($g/\bar{T}$) (числитель — ускорение свободного падения, знаменатель равен 273 К); S — параметр фоновой стратификации (положительные значения параметра соответствуют условиям устойчивого состояния атмосферы [48]); C — концентрация газовой компоненты; $\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ —

коэффициент динамической турбулентной вязкости; $k_T = C_p \eta_T / Sc$ — коэффициент теплопроводности; $k_G = \eta_T / (\rho \cdot Sc)$ — коэффициент диффузионного переноса загрязнений; k — удельная кинетическая энергия турбулентности; ε — скорость вязкой диссипации энергии турбулентности; $P(\vec{u}) = \nabla \vec{u} : (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)$ — тензор скоростей деформаций; ∇ — оператор Гамильтона; T — транспонирование; Sc — число Прандтля-Шмидта; $C_\mu = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ — константы (k - ε)-модели турбулентности.

Коэффициенты турбулентного переноса тепла и примеси в уравнениях (3) и (5) определяются посредством осреднения коэффициента турбулентной вязкости по области моделирования с поправкой на число Прандтля — Шмидта [49, 50].

Используемые при описании граничных и начальных условий обозначения подробно описаны в документации программного продукта COMSOL [35, 36].

Начальные и граничные условия для уравнений (1a, 1б, 2, 3, 4a и 4б).

Начальные условия при $t = 0$

$$\vec{u} = \vec{u}(\vec{x}), \vartheta' = 0, \pi = \pi_0, k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0.$$

Граничные условия (Γ_1 — входная граница; Γ_2 — выходная граница; Γ_3 — верхняя ($z = H$); Γ_4 — нижняя граница (подстилающая поверхность $z = \delta(x)$)) приняты как в модели [51], так и установленные по умолчанию разработчиками программы и не требующие ввода конкретных значений пользователями [35, 36]:

$$\Gamma_1 - u = u_\Phi(z), w = 0, \vartheta' = 0;$$

$$\Gamma_2 - \vec{n} \cdot (-k_T \nabla \vartheta') = 0, \eta_T (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \vec{n} = 0, \pi = \pi_0;$$

$$\Gamma_3 - u = u_\Phi(H), w = 0, \vartheta' = 0;$$

$$\Gamma_4 - \vartheta' = f(x, z, t), \vec{n} \cdot \vec{u} = 0, \eta_T (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) \vec{n} = \left[\rho C_\mu^{0,25} k^{0,25} / \left(\ln(\delta_w^+) / \kappa + C^+ \right) \right] \vec{u},$$

где $u_\Phi(z)$ — профиль горизонтальной скорости (в выполненных расчётах использован логарифмический профиль); $\vec{n}$ — единичный вектор нормали к границе; κ — постоянная Кармана.

Для параметров турбулентности использованы следующие граничные условия, которые установлены по умолчанию [35, 36]:

$$\Gamma_1 - k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0;$$

$$\Gamma_2 - \vec{n} \cdot \nabla k = 0, \vec{n} \cdot \nabla \varepsilon = 0;$$

$$\Gamma_3 - k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0;$$

$$\Gamma_4 - \vec{n} \cdot \nabla k = 0, \varepsilon = C_\mu^{0,75} k^{1,5} / (\kappa \delta_w), \delta_w^+ = \delta_w \rho C_\mu^{0,25} k^{0,5} / \eta.$$

Начальные и граничные условия для уравнения (5).

Начальные условия при $t = 0$

в области пылегазового облака $C = C_0$, в остальной области моделирования $C = 0$.

Граничные условия [35, 36]:

$$\Gamma_1 - C = 0;$$

$$\Gamma_2 - \vec{n} \cdot (-k_C \nabla C) = 0;$$

$$\Gamma_3 - \vec{n} \cdot \vec{N} = 0; \vec{N} = -k_C \nabla C + C \vec{u};$$

$$\Gamma_3 - \vec{n} \cdot \vec{N} = 0; \vec{N} = -k_C \nabla C + C \vec{u}.$$

Последовательность вычислений.

В численных экспериментах проварьирован параметр фоновой стратификации от 0,0 до +0,025 °С/м с шагом 0,005 °С/м, то есть рассмотрены ситуации от равновесной до глубокой инверсии.

В расчётах зафиксированы два параметра модели:

- 1) местоположение пылегазового облака вблизи подошвы карьера в его центральной части;
- 2) начальная концентрация газовой компоненты в облаке принята равной 100 ПДК.

Скорость ветра на борту карьера (на высоте +10 м) принята равной 1 м/с.

Использована трёхшаговая последовательность выполнения расчётов.

Шаг 1 — получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием $(k-\varepsilon)$ -модели турбулентности. Устойчивость вычислений достигается подбором решателя (Direct UMFPACK) и значений демпфирующих коэффициентов (Crosswind diffusion) для уравнений сохранения импульса на уровне 0,65 и (Turbulence isotropic diffusion) для уравнений $(k-\varepsilon)$ -модели на уровне 0,05.

Шаг 2 — отталкиваясь от результатов предыдущего шага, решаем нестационарную задачу аэротермодинамики с выходом практически на стационарный режим аэротермодинамических параметров (продолжительность времени вычислений до 8 час). Устойчивость вычислений при решении уравнения нестационарного переноса тепла обеспечивается выбором указанного выше решателя и значения демпфирующего коэффициента (Isotropic diffusion) на уровне 0,95 (для аэродинамических параметров использованы те же значения демпфирующих коэффициентов, что и на предыдущем шаге).

Шаг 3 — выполняется нестационарный расчёт распространения газовой компоненты с учётом сложившегося к концу второго шага поля скорости и коэффициентов диффузионного переноса загрязнений. Устойчивость вычислений обеспечивается выбором указанного выше решателя и значения демпфирующего коэффициента (Isotropic diffusion) на уровне 0,75. На этом этапе для выхода на уровень ПДК, когда ни в одной ячейке расчётной сетки нет превышения указанного уровня, потребовалось неоднократно выполнять численные эксперименты, чтобы аккуратно зафиксировать расчётное время.

Результаты расчётов и их анализ

Структуры потоков и модификация схем проветривания.

На рис. 3 представлены расчётные структуры полей скорости и линий тока для указанных в табл. 1 шести вариантов для условий нейтральной стратификации (значение параметра $S = 0$ °С/м).

Следует отметить хорошее совпадение структуры потоков с классическими схемами проветривания: прямоточная (угол откоса 10,6°), рециркуляционно-прямоточная (угол откоса 20,6°) и рециркуляционная (угол откоса 31,0–63,4°). Для последней схемы проветривания на рис. 3 чётко проявляется асимметричность вихреобразования и его смещение к подветренному борту карьера.

Окружность по центру — контуры пылегазового облака для последующих расчётов переноса газовой компоненты (условная окись углерода (CO)).

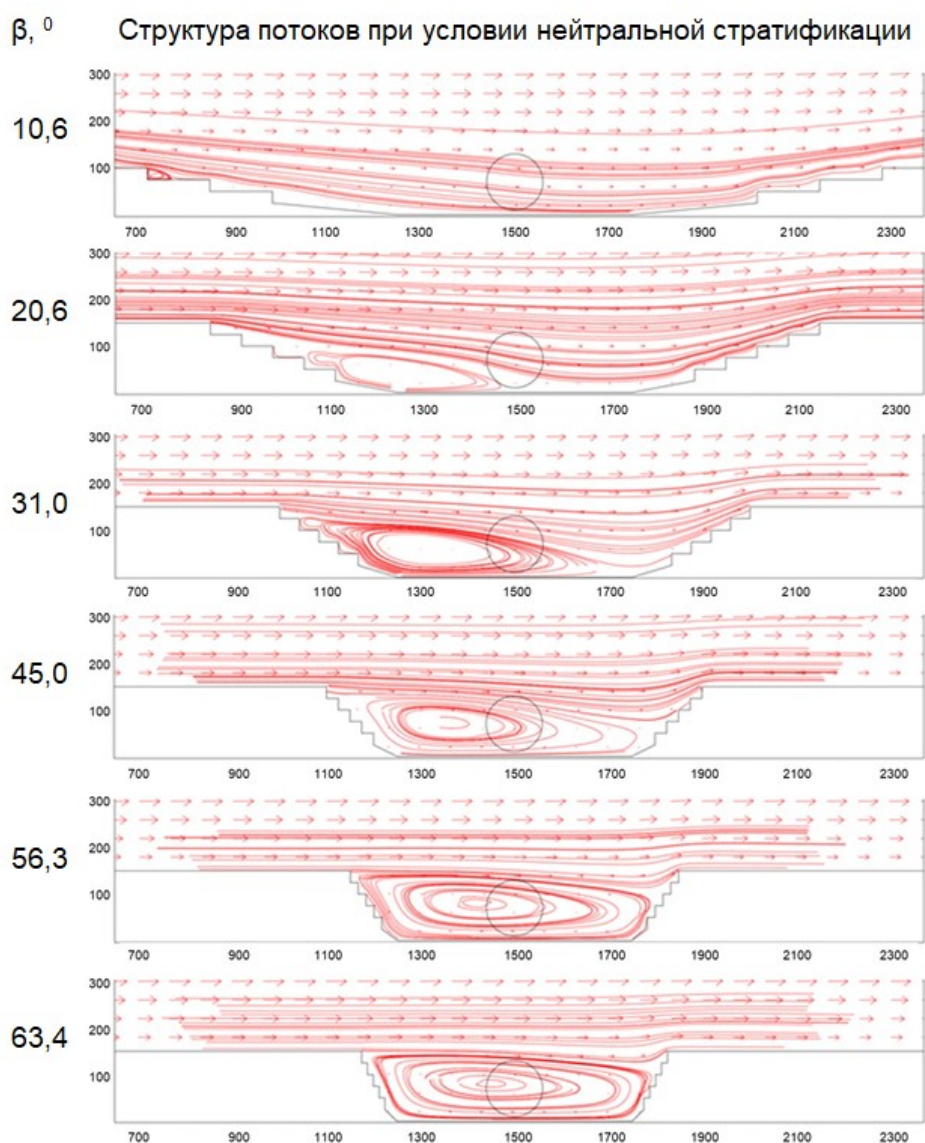


Рис. 3. Расчётные структуры поля скорости и линий тока для указанных в табл. 1 шести вариантов для условий нейтральной стратификации

Fig. 3. Calculated structures of the velocity field and current lines for those indicated in the table 1 six options for neutral stratification conditions

Постепенное включение механизмов плавучести и стратификации от 0,000 до 0,025 °С/м с шагом 0,005 °С/м приводит к заметному изменению структуры поля скорости и линий тока. Особенно этот эффект присущ для карьеров с углами откосов борта менее 30°. Например, для карьера с углом откоса 10,6° схема проветривания из прямоточной переходит в рециркуляционную с расположением вихря в нижней половине карьера практически по всей длине подошвы. Появляющийся обратный поток располагается вдоль подошвы карьера ниже 2-го уступа. Максимальная величина модуля скорости обратного потока в этой ситуации на середине карьера составляет примерно 0,07 м/с.

Более подробно проследим такие изменения на карьере с углом откоса $20,6^\circ$. При нейтральной стратификации имеем рециркуляционно-прямоточную схему проветривания, но с включением указанных выше механизмов прогнозируется существенная перестройка структуры потоков, в результате схема проветривания превращается в рециркуляционную (рис. 4). Усиление инверсионного состояния приводит к более симметричному размещению вихреобразования по пространству карьера.

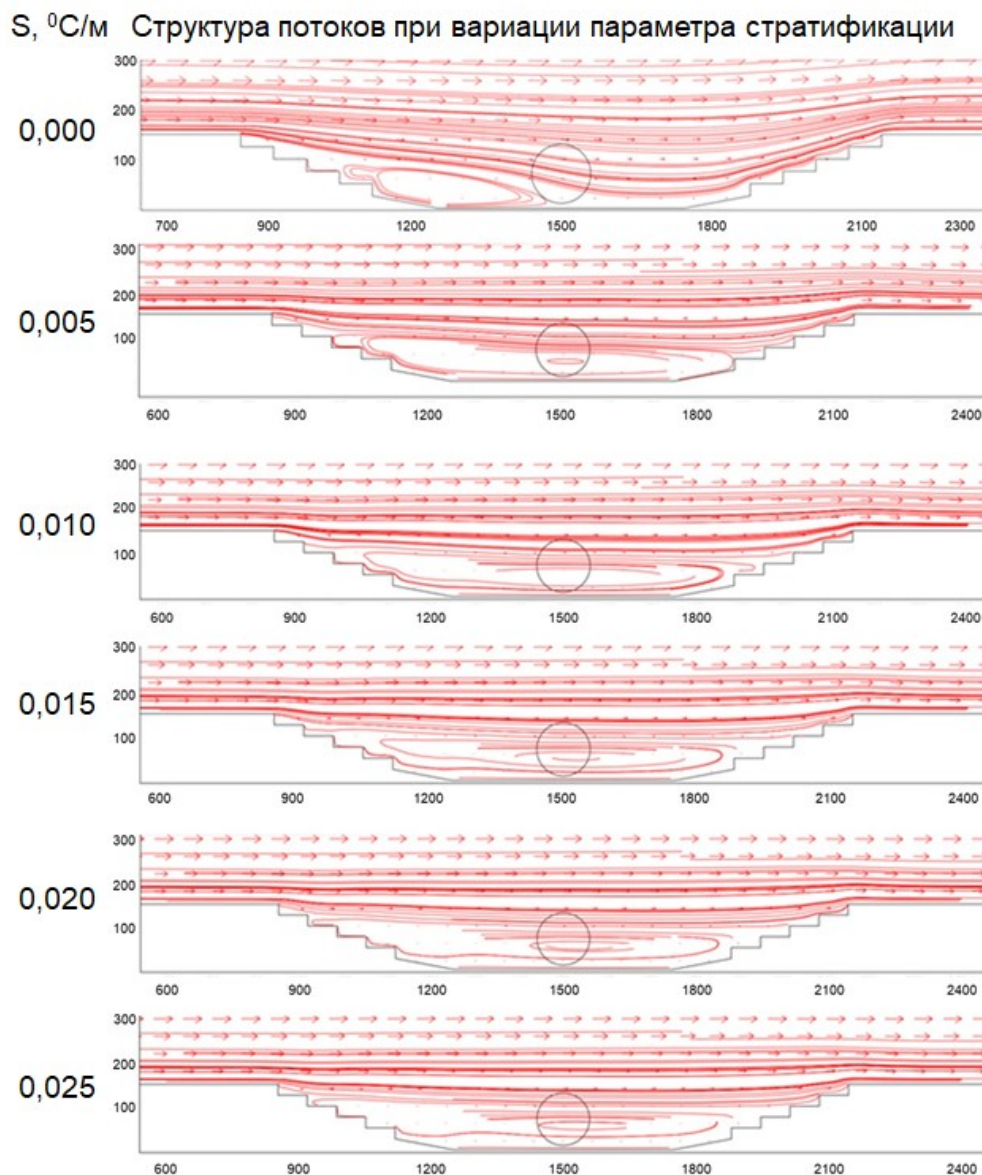


Рис. 4. Расчётные структуры поля скорости и линий тока для варианта угла откоса $20,6^\circ$ и вариации параметра стратификации

Fig. 4. Calculated structures of the velocity field and streamlines for the slope angle variant of 20.60° and variation of the stratification parameter

В приведённой ситуации для координаты вдоль оси $X = 1500$ м прослежен размер обратного потока (табл. 2). Видно, что наиболее резкий «скачок» прогнозируется на начальном этапе ухода от нейтральной атмосферы и с постепенным затуханием изменений с усилением инверсии атмосферы.

При этом максимальные по модулю значения скорости обратного потока составляют от 0,01 до 0,09 м/с, тогда как максимальные значения скорости прямого потока в карьере находятся на уровне от 0,65 до 0,43 м/с.

Для карьеров с углами откоса более 30° схема проветривания с включением учёта механизмов плавучести и стратификации не меняется. С усилением инверсии (увеличение параметра фоновой стратификации) зона рециркуляции «растягивается» и простирается практически вдоль всей подошвы карьера.

Таблица 2

Примерный размер зоны обратного потока при угле откоса $20,6^\circ$ в вертикальном сечении, восстановленном в координате $X = 1500$ м, при вариации параметра стратификации S
The approximate size of the backflow zone at a slope angle of $20,60^\circ$ in the vertical section, reconstructed at the $X = 1500$ m coordinate, with a variation of the stratification parameter S

$S, ^\circ\text{C}/\text{м}$	0,000	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
Размер, м	~3	~44	~48	~52	~54	~56

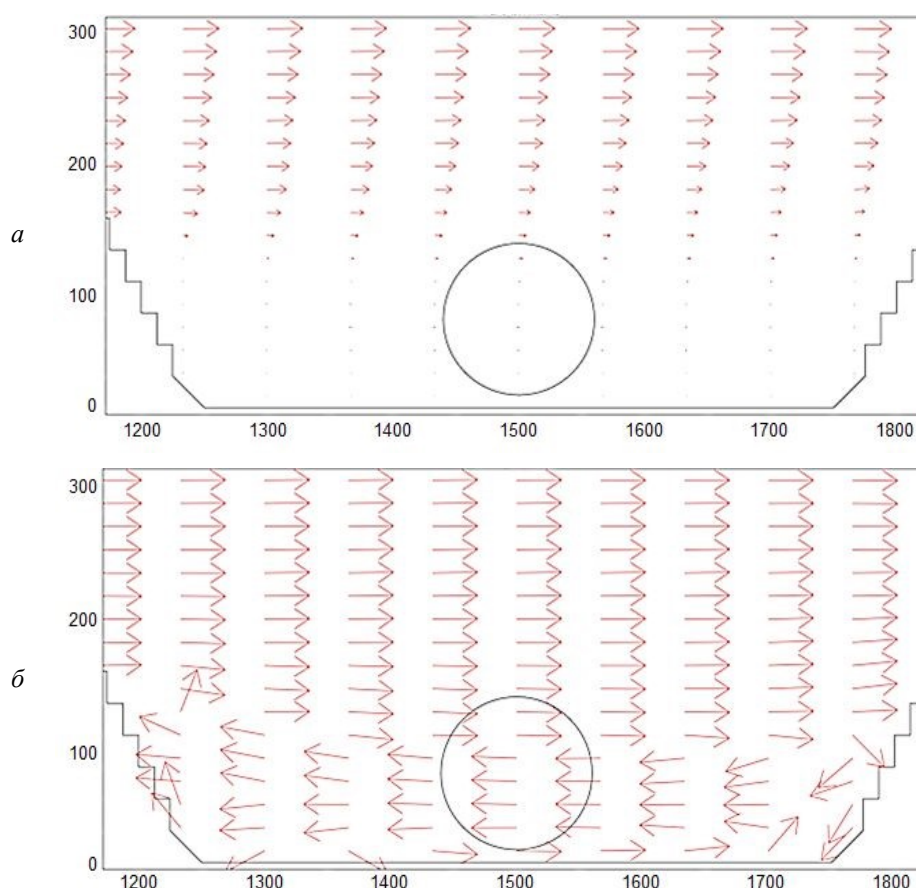


Рис. 5. Структура поля скорости в карьере с углом откоса $63,4^\circ$ при значении параметра стратификации $0,025 ^\circ\text{C}/\text{м}$:
 a — пропорциональный вид (длина стрелок пропорциональна величине векторного поля);
 b — нормализованный вид (стрелки указывают только направление вектора скорости)

Fig. 5. The structure of the velocity field in a quarry with a slope angle of 63.40° with a stratification parameter value of $0,025 ^\circ\text{C}/\text{м}$: a — proportional view (the length of the arrows is proportional to the magnitude of the vector field), b — normalized view (the arrows indicate only the direction of the velocity vector)

Для карьеров с высоким значением угла откоса борта карьера проявляется эффект послойного течения, что соответствует явлению, отмеченному в работе [33]. В качестве иллюстрации эффекта учёта механизмов плавучести и стратификации на рис. 5 представлена структура поля скорости в карьере с углом откоса $63,4^\circ$ при максимальном значении параметра стратификации $0,025\text{ }^\circ\text{C/м}$. Векторы скорости приведены как в пропорциональной форме (рис. 5а), так в нормализованном виде (рис. 5б). Как видим на рис. 5б, при усилении стратификации атмосферы внутри карьера имеет место послойное выстраивание потоков. В результате в дополнение к рециркуляционной схеме проветривания имеем более сложную структуру потоков, при этом вдоль подошвы карьера прогнозируется скорость прямого потока на уровне $0,02\text{ м/с}$ и над ним обратного потока на уровне $-0,05\text{ м/с}$.

Моделирование процессов проветривания при поведении взрывных работ.

Постепенное изменение структуры поля скорости и линий тока для всех углов откосов бортов карьера отражается на процессах проветривания и их длительности до выхода на уровень ПДК в области моделирования (см. табл. 3 и рис. 6).

Таблица 3

Время проветривания карьера при вариации угла откоса борта карьера
и параметра фоновой стратификации, час
Ventilation time of the quarry with variation of the slope angle of the side of the quarry
and the background stratification parameter, hour

$S, ^\circ\text{C/м}$	Угол откоса, град					
	10,6	20,6	31,0	45,0	56,3	63,4
0,000	0,676	0,997	2,132	1,972	2,064	2,101
0,005	2,044	2,378	2,775	2,883	3,675	3,875
0,010	2,097	2,453	2,933	3,186	4,269	4,567
0,015	2,136	2,558	3,081	3,403	4,617	4,922
0,020	2,161	2,650	3,197	3,550	4,803	5,106
0,025	2,183	2,722	3,286	3,658	4,908	5,219



Рис. 6. Время проветривания карьера при вариации угла откоса борта карьера
и параметра фоновой стратификации
Fig. 6. The ventilation time of the quarry with variations in the slope angle of the side of the quarry
and the parameter of background stratification

Хорошо видно, что в условиях нейтральной стратификации для рассматриваемого варианта начального положения ПГО длительность проветривания карьеров с углами откоса борта карьера более 30° изменяется незначительно (на уровне 6–7 %).

Включение учёта механизмов плавучести и атмосферной стратификации увеличивает время проветривания на более серьёзную величину, особенно для углов откоса борта карьера более 50° . На рис. 6 чётко видно, что при углах откоса более 50° производная функций времени проветривания заметно увеличивается.

На примере карьера с углом откоса борта 45° представлены пространственные распределения загрязнения в пространстве карьера на моменты достижения уровня ПДК (рис. 7). Здесь же сохранены векторы скоростей и линии тока, а также изображение начального положения пылегазового облака, что облегчает визуальный анализ пространственных распределений загрязнения.

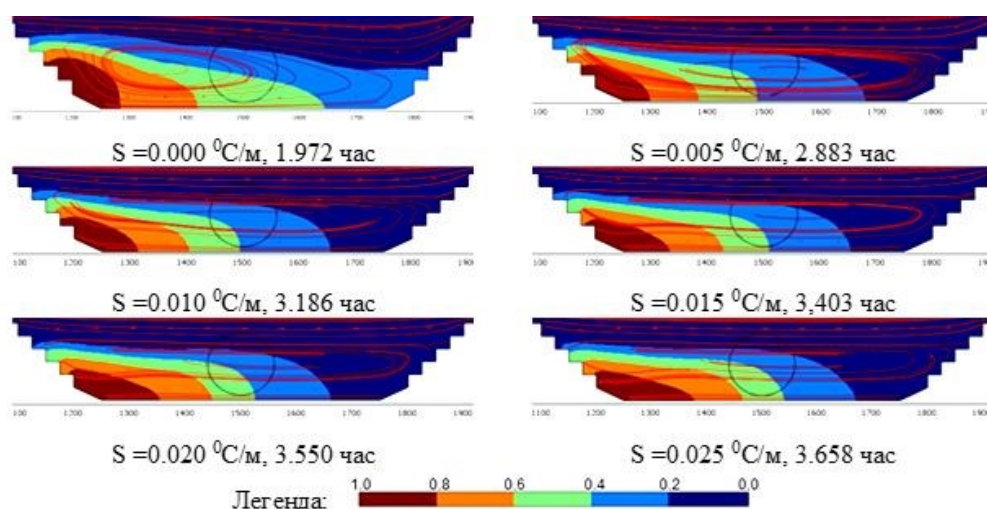


Рис. 7. Пространственные распределения загрязнения в пространстве карьера с углом откоса 45° на моменты достижения уровня ПДК при вариации параметра стратификации
Fig. 7. Spatial distributions of pollution in the quarry space with a slope angle of 45° at the time of reaching the MPC level with variation of the stratification parameter

Поскольку при рассмотренных значениях параметра стратификации схема проветривания карьера не меняется (остаётся рециркуляционной), то во всех случаях в последнюю очередь очищается пространство со стороны подветренного борта в его нижней части. Если при нейтральной стратификации имеем максимальные по площади области загрязнения с указанными в легенде рис. 7 значениями концентраций, то при разных значениях параметра стратификации структура областей загрязнения изменяется не столь значительно, однако определённые особенности в структуре загрязнения можно отметить. Так, с усилением стратификации постепенно очищается берма на отметке 50 м и увеличивается горизонтальная координата области загрязнения вдоль подошвы карьера, что свидетельствует о постепенном «придавливании» загрязнения к основанию карьера.

Заключение

Представлен короткий обзор публикаций и результатов исследований, которые подчёркивают необходимость выполнения изысканий по разработке стратегий сокращения загрязнения атмосферы в промышленных центрах и населённых пунктах, расположенных в районах со сложной орографией (горные цирки, котловины).

На примере неглубоких карьеров (как аналогов горных котловин и классифицируемых при проведении взрывных работ по различным схемам проветривания) исследован процесс их

естественного проветривания при массовых взрывах с учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации.

Результаты исследования, выполненные на базе метода численного моделирования, показали:

- построенные компьютерные модели для условий нейтральной стратификации продемонстрировали строгое соответствие расчётным схемам проветривания по типологии классиков аэрологии карьеров В. С. Никитина и Н. З. Битколова;
- учёт механизмов плавучести и фоновой стратификации прогнозирует существенную перестройку структуры воздушных потоков и переводит прямоточную и рециркуляционно-прямоточную схемы проветривания в рециркуляционную;
- усиление фоновой стратификации приводит к «растягиванию» зоны рециркуляции и её простиранию практически вдоль всей подошвы карьера;
- при больших значениях углов откоса карьера прогнозируется послойное выстраивание потоков противоположного направления;
- рост значений параметра фоновой стратификации приводит к увеличению времени проветривания карьеров по сравнению с нейтральным состоянием атмосферы в 2–3 раза.

Представляется, что подобные модели в полной 3D-постановке с определённой модернизацией могут быть использованы так же и для прогнозных оценок загрязнения атмосферы от промышленных выбросов в горных котловинах и цирках.

Список источников

1. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: справочное пособие / под ред. Э. Ю. Безуглой, М. Е. Берлянд. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 328 с.
2. Влияние рельефа на загрязнение воздуха. URL: <https://kurnyavkabox.ru/vliyanie-relefa-na-zagryaznenie-vozduxa/> (дата обращения 23.10.2023).
3. Алоян А. Е., Бакланов А. А. Моделирование физических процессов в атмосфере в условиях сложной орографии // Численные методы в задачах физики атмосферы и охраны окружающей среды / ред. проф. В. В. Пененко. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. С. 29–44.
4. Baklanov A. Application of CFD methods for modeling in air pollution problems: possibilities and gaps // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 65. P. 181–190. doi:10.1023/A:1006442514766.
5. Промышленное загрязнение воздуха в России. URL: https://www.dishisvobodno.ru/promishlennoe_zagryaznenie.html (дата обращения: 23.10.2023).
6. Проблемы разработки Удоканского месторождения меди / С. Н. Радионов [и др.]. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1990. 192 с.
7. Чем мы дышим, когда над Красноярском нависает «чёрное небо»? URL: <https://dprom.online/unsolution/chyornoe-nebo-v-krasnoyarske-s-mesta-sobytij/> (дата обращения 23.10.2023).
8. Щербатюк А. П. Методологические основы атмосферодиагностики урбанизированных геосистем межгорных котловин (на примере Забайкалья): 1.6.21: дис. ... д-ра техн. наук. Чита, 2023. 251 с.
9. Щербатюк А. П. Концепция обеспечения экологической безопасности воздушной среды городов в природно-технических системах горно-котловинного типа // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 4. С. 24–30. doi:10.25750/1995-4301-2019-4-024-030.
10. Simulation of Air Pollution in Almaty City under Adverse Weather Conditions / E. A. Zakarin [et al.] // Russ. Meteorol. Hydrol. 2021. Vol. 46, no. 2. P. 121–128. <https://doi.org/10.3103/S1068373921020072>.
11. Modeling of the Calm Situations in the Atmosphere of Almaty / E. A. Zakarin [et al.] // Asian J. Atmospheric Environment. 2022. Vol. 16 (2). doi: <https://doi.org/10.5572/ajae.2022.007>.
12. Mammadova Sh. Assessment of Pollution of the Atmospheric Air in the Cities of Azerbaijan // Intern. J. Humanities and Social Science. 2013. Vol. 3, no. 18. P. 128–136.
13. Büke T., Köne A.Ç. Assessing Air Quality in Turkey: A Proposed, Air Quality Index // Sustainability. 2016. No. 8. P. 73. doi:10.3390/su8010073.
14. Лю Чж. Состояние природной среды и экологическая политика Китая // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-prirodnoy-sredy-i-ekologicheskaya-politika-kitaya> (дата обращения 30.10.2023).
15. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China / N. L. Bei [et al.] // Atmos. Chem. Phys. 2016. Vol. 16. P. 7373–7387. doi:10.5194/acp-16-7373-2016.

16. The National report on the State of the Environment of the Kyrgyz republic for 2006–2011. Bishkek, 2012. 126 p.
17. Apostol L., Ilie N. Thermal hazards in cold semester of the year in the mountain area of Moldova river (sector between Vama and the Springs of Moldova river) // *Present Environment and Sustainable Development*. 2015. Vol. 9, no. 1. P. 251–261. doi:10.1515/pesd-2015-0019.
18. Heavy metals in the air in the snow cover of Ulaanbaatar city / O. I. Sorokina [et al.] // *Geography and Natural Resources*. 2013. Vol. 34, no. 3. P. 291–301.
19. Аргучинцева А. В., Воложжина С. Ж. Загрязнение атмосферного воздуха Байкальской котловины // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*. 2011. Т. 4, № 2. С. 28–41.
20. Гранберг И. Г. Физические механизмы и экологические проблемы загрязнения атмосферного пограничного слоя над неоднородными поверхностями: 03.00.16: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2009. 57 с.
21. Granberg I. G. Numerical simulation of possible extreme events due to orography at Cyprus // *Phys. Chem. Earth (B)*. 1999. Vol. 24, no. 6. P. 649–652.
22. Леженин А. А., Рапуга В. Ф., Ярославцева Т. В. Численный анализ атмосферной циркуляции и распространения загрязняющих примесей в окрестностях Норильского промышленного района // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 29, № 6. С. 467–471.
23. Шлычков В. А., Мальбахов В. М., Леженин А. А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 490–496.
24. Model inventory. URL: https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=6295&no_cache=1 (дата обращения: 07.05.2022).
25. Аэродинамика горных отвалов угольных шахт / Н. М. Качурин [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 23–33.
26. Khazins V. M., Shuvalov V. V., Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, Iss. 10. P. 1112. <https://doi.org/10.3390/atmos11101112>.
27. Nuterman R. B., Baklanov A. A., Starchenko A. V. Modeling of aerodynamics and pollution dispersion from traffic in the urban sublayer // *Mathematical Models and Computer Simulation*. 2010. Vol. 2, Iss. 6. P. 738–752. <https://doi.org/10.1134/S2070048210060098>.
28. Старченко А. В., Нутерман Р. Б., Данилкин Е. А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 252 с.
29. Flores F., Garreaud R., Muñoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation // *Computers & Fluids*. 2014. Vol. 90. P. 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.012>.
30. Wolf-Grosse T., Esau I., Reuder J. Sensitivity of local air quality to the interplay between small- and large-scale circulations: a Large Eddy Simulation study // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. Vol. 17. P. 7261–7276. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7261-2017>.
31. Wolf T., Pettersson L. H., Esau, I. A very high-resolution assessment and modelling of urban air quality // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. Vol. 20. P. 625–647. <https://doi.org/10.5194/acp-20-625-2020>.
32. Глазунов А. В. Численное моделирование устойчиво-стратифицированных турбулентных течений над поверхностью городского типа. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 4. С. 406–419. doi:10.7868/80002351514010039.
33. Слоистая структура устойчиво-стратифицированных турбулентных течений со сдвигом скорости / А. В. Глазунов [и др.] // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 4. С. 13–26. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555413-26>.
34. Никитин В. С., Битколов Н. З. Проектирование вентиляции в карьерах. М.: Недра, 1980. 171 с.
35. Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.01.2022).
36. CFD Module User's Guide // Comsol official site. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 16.11.2020).
37. Амосов П. В., Бакланов А. А. Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL // *Вестник МГТУ*. 2023. Т. 26, № 1. С. 25–44. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44.
38. Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Исследование влияния теплового фактора на аэродинамические параметры атмосферы карьера на основе трёхмерного компьютерного моделирования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал): [спецвып. 37]*. 2019. № 11. С. 322–332. doi:10.25018/0236-1493-2019-11-37-322-332.

39. Баширов Н. Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока // Изв. вузов. Горный журнал. 2018. № 2. С. 40–47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47>.
40. Бублик С. А., Семин М. А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1 (86). С. 126–133.
41. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 59–75. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>.
42. Гридина Е. Б., Петров И. А. Опыт математического моделирования процесса проветривания Оленегорского карьера в программном комплексе FlowVision // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). 2017. Т. 1, № 5. С. 32–42.
43. Трёхмерное компьютерное моделирование аэродинамики атмосферы глубоких карьеров / С. А. Козырев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). 2017. Т. 1, № 5. С. 84–92.
44. Ястребова К. Н. Имитационное моделирование процесса обтекания бортов открытой горной выработки естественным ветровым потоком // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 8. С. 60–62.
45. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines / Z. Huang [et al.] // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17, Iss. 5. P. 10313–10333. https://doi.org/10.15666/aer/1705_1031310333.
46. Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures: PhD diss. / University of Alaska Fairbanks. 2015. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (accessed 16.11.2020).
47. Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine // ACS Omega. 2021. Vol. 6, Iss. 1. P. 448–455. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>.
48. Изменение потенциальной температуры с высотой при различных видах стратификации атмосферы. URL: <https://mydocx.ru/9-112360.html> (дата обращения: 17.05.2020).
49. Теодорович Э. В. Явления турбулентного переноса и метод ренормализационных групп // Журнал прикладной математики и механики. Вып. 2. 1988. Т. 52. С. 218–224.
50. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows / C. Gualtieri [et al.] // Fluids. 2017. No. 2. P. 1–27. doi:10.3390/fluids2020017.
51. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 200 с.

References

1. *Klimaticheskie kharakteristiki uslovii rasprostraneniya primesei v atmosfere* [Climatic characteristics of the conditions for the propagation of impurities in the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 328 p.
2. *Vliyanie rel'efa na zagryaznenie vozdukha* [The impact of terrain on air pollution]. (In Russ.). Available at: <https://kurnyavkabox.ru/vliyanie-relefa-na-zagryaznenie-vozdukha/> (accessed 23.10.2023).
3. Aloyan A. E., Baklanov A. A. Modelirovanie fizicheskikh protsessov v atmosfere v usloviyakh slozhnoi orografii [Modeling of physical processes in the atmosphere under conditions of complex orography]. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki atmosfery i okhrany okruzhayushchei sredy* [Numerical methods in problems of atmospheric physics and environmental protection]. Novosibirsk, Computing Centre of Siberian Division of Academy of Sciences USSR Publ., 1985, p. 29–44.
4. Baklanov A. Application of CFD methods for modeling in air pollution problems: possibilities and gaps. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, Vol. 65, pp. 181–190. doi:10.1023/A:1006442514766.
5. *Promyshlennoe zagryaznenie vozdukha v Rossii* [Industrial air pollution in Russia]. (In Russ.). Available at: https://www.dishisvobodno.ru/promishlennoe_zagryaznenie.html (accessed 23.10.2023).
6. Radionov S. N., Reshetnyak S. P., Krasnosel'skiy E. B., Baklanov A. A., Usynin V. I., Popkov V. V., Pyatlov M. M., Gushchin V. V., Epimahov Yu. A., Torochkov G. S., Lebedev V. P., Sokolov V. P., Arhipov A. V., Demidov Yu. V., Pekar' A. V., Kuleshov A. A., Serebrennikov O. D., Shcherbina A. N., Mel'nikov N. N., Chashnikov V. V., Kalabin G. V., Rigina O. Yu., Eremin G. M., Mazuhina S. I., Kovaleva G. A., Nagovicyn O. V., Koshkin V. V., Haritonov V. Yu. *Problemy razrabotki Udokanskogo mestorozhdeniya medi* [Problems of development of the Udokan copper deposit]. Apatity, Kola Science Centre of Academy of Sciences USSR Publ., 1990, 192 p.
7. Chem my dyshim, kogda nad Krasnoyarskom navisaet “chernoe nebo”? [What do we breathe when the “black sky” hangs over Krasnoyarsk?]. (In Russ.). Available at: <https://dprom.online/unsolution/chyornoe-nebo-v-krasnoyarske-s-mesta-sobytij/> (accessed 23.10.2023).
8. Shcherbatyuk A. P. *Metodologicheskie osnovy atmoekodiagnosticski urbanizirovannykh geosistem mezhgornyykh kotlovin (na primere Zabaikal'ya)*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodological foundations of atmoecodiagnostics of urbanized geosystems of intermountain basins (on the example of Transbaikalia). Dr. Sci. (Engineering) diss.]. Chita, 2023. 251 p.

9. Shcherbatyuk A. P. Kontseptsiya obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti vozdukhnoy sredy gorodov v prirodno-tekhnicheskikh sistemakh gorno-kotlovinnogo tipa [The concept of ensuring the ecological safety of the urban air environment in natural-technical systems of the mountain-basin type]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2019, no. 4, p. 24–30. doi:10.25750/1995-4301-2019-4-024-030. (In Russ.).
10. Zakarin E. A., Baklanov A. A., Balakay L. A., Dedova T., Bostanbekov K. Simulation of Air Pollution in Almaty City under Adverse Weather Conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, Vol. 46, no. 2, pp. 121–128. <https://doi.org/10.3103/S1068373921020072>.
11. Zakarin E., Baklanov A., Balakay L., Dedova T., Bostanbekov K. Modeling of the Calm Situations in the Atmosphere of Almaty. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2022, Vol. 16 (2). <https://doi.org/10.5572/ajae.2022.007>.
12. Mammadova Sh. Assessment of Pollution of the Atmospheric Air in the Cities of Azerbaijan. *International Journal of Humanities and Social Science*, 2013, Vol. 3, no. 18, pp. 128–136.
13. Büke T., Köne A.Ç. Assessing Air Quality in Turkey: A Proposed, Air Quality Index. *Sustainability*, 2016, no. 8, pp. 73. doi:10.3390/su8010073.
14. Lyu Ch. *Sostoyanie prirodnoi sredy i ekologicheskaya politika Kitaya* [The state of the natural environment and environmental policy of China]. 2014. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-prirodnoy-sredy-i-ekologicheskaya-politika-kitaya> (accessed 30.10.2023).
15. Bei N., Li G., Huang R.-J., Cao J., Meng N., Feng T., Liu S., Zhang T., Qiang Zh., Molina L. T. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China. *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, Vol. 16, pp. 7373–7387. doi:10.5194/acp-16-7373-2016.
16. The National report on the State of the Environment of the Kyrgyz republic for 2006–2011. Bishkek, 2012, 126 p.
17. Apostol L., Ilie N. Thermal hazards in cold semester of the year in the mountain area of Moldova river (sector between Vama and the Springs of Moldova river). *Present Environment and Sustainable Development*, 2015, Vol. 9, no. 1, p. 251–261. doi:10.1515/pesd-2015-0019.
18. Sorokina O. I., Kosheleva N. E., Kasimov N. S., Golovanov D. L., Bazha S. N., Dorzhgotov D., Enkh-Amgalan S. Heavy metals in the air in the snow cover of Ulaanbaatar city. *Geography and Natural Resources*, 2013, Vol. 34, no. 3, pp. 291–301.
19. Arguchintseva A. V., Vologzhina S. Zh. Zagryaznenie atmosfernogo vozdukha Baikal'skoi kotloviny [Atmospheric air pollution of the Baikal basin], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Nauki o Zemle"* [Proceedings of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"], 2011, Vol. 4, no. 2, pp. 28–41. (In Russ.).
20. Granberg I. G. *Fizicheskie mekhanizmy i ekologicheskie problemy zagryazneniya atmosfernogo pogrannichnogo sloya nad neodnorodnymi poverkhnostyami. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* [Physical mechanisms and environmental problems of atmospheric boundary layer pollution over inhomogeneous surfaces. Dr. Sci. (Phys.-Math.) diss.]. Moscow, 2009, 57 p.
21. Granberg I. G. Numerical simulation of possible extreme events due to orography at Cyprus. *Phys. Chem. Earth (B)*, 1999, Vol. 24, no. 6, pp. 649–652.
22. Lezhenin A. A., Raputa V. F., Yaroslavl'tseva T. V. Chislennyi analiz atmosferno tsirkulyatsii i rasprostraneniya zagryaznyayushchikh primesei v okrestnostyakh Noril'skogo promyshlennogo raiona [Numerical analysis of atmospheric circulation and distribution of pollutants in the vicinity of the Norilsk industrial district]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2005, Vol. 29, no. 6, pp. 467–471. (In Russ.).
23. Shlychkov V. A., Mal'bakhov V. M., Lezhenin A. A. Chislennoe modelirovanie atmosferno tsirkulyatsii i perenosa zagryaznyayushchikh primesei v Noril'skoi doline [Numerical simulation of atmospheric circulation and transport of pollutants in the Norilsk Valley]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2005, Vol. 18, no. 5–6, pp. 490–496. (In Russ.).
24. Model inventory. Available at: https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=6295&no_cache=1 (accessed 07.05.2022).
25. Kachurin N. M., Stas' G. V., Levin A. D., Rybak V. L. Aerodinamika gornykh otvalov ugol'nykh shakht [Aerodynamics of coal mine dumps]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences], 2016, Iss. 1, pp. 23–33. (In Russ.).
26. Khazins V. M., Shuvalov V. V., Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting. *Atmosphere*, 2020, Vol. 11, Iss. 10, pp. 1112. <https://doi.org/10.3390/atmos11101112>.
27. Nuterman R. B., Baklanov A. A., Starchenko A. V. Modeling of aerodynamics and pollution dispersion from traffic in the urban sublayer. *Mathematical Models and Computer Simulation*, 2010, Vol. 2, Iss. 6, pp. 738–752. <https://doi.org/10.1134/S2070048210060098>.
28. Starchenko A. V., Nuterman R. B., Danilkin E. A. *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenii i perenosa primesei v ulichnykh kan'onakh* [Numerical simulation of turbulent flows and impurity transport in street canyons]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2015, 252 p.

29. Flores F., Garreaud R., Muñoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. *Computers & Fluids*, 2014, Vol. 90, pp. 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.012>.
30. Wolf-Grosse T., Esau I., Reuder J. Sensitivity of local air quality to the interplay between small- and large-scale circulations: a Large Eddy Simulation study. *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, Vol. 17, pp. 7261–7276. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7261-2017>.
31. Wolf T., Pettersson L., Esau I. A very high-resolution assessment and modelling of urban air quality. *Atmos. Chem. Phys.*, 2020, Vol. 20, pp. 625–647. <https://doi.org/10.5194/acp-20-625-2020>.
32. Glazunov A. V. Chislennoe modelirovanie ustoichivo-stratifikirovannykh turbulentnykh techenii nad poverkhnost'yu gorodskogo tipa. Spektry i masshtaby, parametrizatsiya profilei temperatury i skorosti [Numerical simulation of stably stratified turbulent flows over an urban-type surface. Spectra and scales, parameterization of temperature and velocity profiles]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [News of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics], 2014, Vol. 50, no. 4, pp. 406–419. doi:10.7868/80002351514010039 (In Russ.).
33. Glazunov A. V., Mortikov E. V., Barskov K. V., Kadantsev E. V., Zilitinkevich S. S. Sloistaya struktura ustoichivo-stratifikirovannykh turbulentnykh techenii so sdvigom skorosti [Layered structure of stably stratified turbulent flows with velocity shift]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [News of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics], 2019, Vol. 55, no. 4, pp. 13–26. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555413-26> (In Russ.).
34. Nikitin V. S., Bitkolov N. Z. *Proektirovanie ventilyatsii v kar'erakh* [Ventilation design in open-pits]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 171 p.
35. *Integrirrovannaya sreda chislennogo modelirovaniya COMSOL* [Integrated Numerical Simulation Environment COMSOL]. (In Russ.). Available at: <https://www.comsol.ru/> (accessed 12.01.2022).
36. CFD Module User's Guide. Comsol official site. Available at: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> (accessed 16.11.2020).
37. Amosov P. V., Baklanov A. A. Razrabotka modeli aerotermodinamiki atmosfery dlya issledovaniya protsessov pyleniya na khvostokhranilishchakh s ispol'zovaniem programmy COMSOL [Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for the study of dusting processes at tailings dumps using the COMSOL program]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2023, Vol. 26, no. 1, pp. 25–44. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44 (In Russ.).
38. Amosov P. V., Kozyrev S. A., Nazarchuk O. V. Issledovanie vliyaniya teplovogo faktora na aerodinamicheskie parametry atmosfery kar'era na osnove trekhmernogo komp'yuternogo modelirovaniya [Investigation of the influence of the thermal factor on the aerodynamic parameters of the open-pit atmosphere based on three-dimensional computer modeling]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2019, no. S 37, pp. 322–332. doi:10.25018/0236-1493-2019-11-37-322-332 (In Russ.).
39. Bashirov N. R. Metod dinamicheskogo proektirovaniya otvalov pri predvaritel'noi simulyatsii vozdušnogo potoka [The method of dynamic design of dumps with preliminary simulation of air flow]. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining Magazine], 2018, no. 2, pp. 40–47. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47> (In Russ.).
40. Bublik S. A., Semin M. A. Matematicheskoe modelirovanie teplo- i vozdukhoraspredeleniya v kar'erakh pri estestvennom provetrivani [Mathematical modeling of heat and air distribution in open-pits with natural ventilation]. *Gornoe echo* [Mountain Echo], 2022, no. 1 (86), pp. 126–133. (In Russ.).
41. Gendler S. G., Borisovskii I. A. Otsenka osobennostei formirovaniya temperaturnykh inversii pri otkrytoi dobyche poleznykh iskopaemykh v usloviyakh Arktiki [Assessment of the peculiarities of the formation of temperature inversions during open-pit mining in the Arctic]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences], 2021, no. 4, pp. 59–75. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75> (In Russ.).
42. Gridina E. B., Petrov I. A. Opyt matematicheskogo modelirovaniya protsessa provetrivaniya Olenegorskogo kar'era v programnom komplekse FlowVision [Experience in mathematical modeling of the Olenegorsky open-pit ventilation process in the FlowVision software package]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2017, no. S 5-1, pp. 32–42. (In Russ.).
43. Kozyrev S. A., Nikitin R. M., Amosov P. V., Massan V. V. Trekhmernoe komp'yuternoe modelirovanie aerodinamiki atmosfery glubokikh kar'erov [Three-dimensional computer simulation of the aerodynamics of the atmosphere

- of deep open-pits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2017, no. S 5-1, pp. 84–92. (In Russ.).
44. Yastrebova K. N. Imitatsionnoe modelirovanie protsessa obtekaniya bortov otkrytoi gornoj vyrabotki estestvennym vetrovym potokom [Simulation modeling of the process of flowing around the sides of an open mine by a natural wind flow]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2014, no. 8, pp. 60–62. (In Russ.).
 45. Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, Vol. 17, Iss. 5, pp. 10313–10333. https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1031310333.
 46. Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures. PhD diss. University of Alaska Fairbanks, 2015. Available at: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756> (accessed 16.11.2020).
 47. Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine. *ACS Omega*, 2021, Vol. 6, Iss. 1, p. 448–455. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>.
 48. *Izmenenie potentsial'noi temperatury s vysotoi pri razlichnykh vidakh stratifikatsii atmosfery* [The change in potential temperature with altitude under various types of atmospheric stratification]. (In Russ.). Available at: <https://mydocx.ru/9-112360.html> (accessed 17.05.2020).
 49. Teodorovich E. V. Yavleniya turbulentnogo perenosa i metod renormalizatsionnykh grupp [Phenomena of turbulent transport and the method of renormalization groups]. *Zhurnal prikladnoi matematiki i mekhaniki* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1988, Vol. 52, Iss. 2, pp. 218–224. (In Russ.).
 50. Gualtieri C., Angeloudis A., Bombardelli F., Jha S., Stoesser T. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows. *Fluids*, 2017, No 2, pp. 1–27. doi:10.3390/fluids2020017.
 51. Baklanov A. A. *Chislennoe modelirovanie v rudnichnoi aerologii* [Numerical modeling in mine aerology]. Apatity, Kola Branch of Academy of Sciences USSR Publ., 1988, 200 p.

Информация об авторах

П. В. Амосов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

А. А. Бакланов — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, консультант ВМО

Information about the authors

P. V. Amosov — PhD (Engineering), Leading Researcher;

A. A. Baklanov — Dr. Sc. (Phys.&Math.), Professor, Chief Scientist, Consultant WMO

Статья поступила в редакцию 06.01.2025; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 06.01.2025; approved after reviewing 07.04.2025; accepted for publication 24.04.2025.