

УДК 911.2, 504.05, 551.582
DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

Оригинальная статья

Математическое моделирование аэродинамики идеализированных горных ущелий

Е.С. Каменецкий^{id}, А.А. Радионов^{id}

Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 53,
e-mail: aar200772@mail.ru

Статья поступила: 04.06.2024, доработана: 06.09.2024, принята к публикации: 07.09.2024

Резюме: Актуальность работы. В горных территориях расположены хвостохранилища, в которых, часто открытым способом, содержатся «хвосты» – отходы деятельности горнодобывающих комбинатов, откуда в летнее время, при солнечном нагреве и заметном ветре в виде мелкой пыли хвосты попадают в атмосферу горных ущелий. Многофакторные течения воздуха и сложные закономерности аэродинамики горных ущелий обуславливают необходимость исследования каждого конкретного ущелья отдельно. Изучение горных ущелий идеализированной формы удобно использовать для подробного анализа атмосферных течений в практически важных прикладных задачах мониторинга аэродинамических характеристик и распространения ЗВ в реальных ущельях. **Методы.** При помощи математического моделирования рассматриваются трехмерные изотермические течения атмосферы в горном ущелье с идеализированной геометрической формой в виде прямоугольной каверны, ориентированной с юга на север. **Целью исследования** является изучение влияния отношения ширины горного ущелья к его высоте и сопоставление результатов модельных расчетов, полученных для Алагирского ущелья, РСО-Алания, РФ. **Результаты.** Показано, что при отношении ширины к его высоте большем трех горное ущелье относится к условно «широким». Анализ аэродинамических свойств Алагирского ущелья позволяет сделать вывод, что в точке нахождения Унальского хвостохранилища это ущелье соответствует широкому ущелью. Такой вывод можно сделать из соответствия роз ветров этих ущелий и из приблизительного соответствия нестационарных режимов течения по направлениям внешнего ветра. Для идеализированных ущелий разной ширины показаны розы ветров, характерные профили скорости ветра в поперечном сечении ущелья, частоты и амплитуды возникающих осцилляций при разных направлениях внешнего ветра, а также распределения концентрации примеси от источника, расположенного на дне ущелья, как маркера режимов течения. Знание закономерностей течения воздуха в идеализированных горных ущельях позволяет проводить более глубокий анализ аэродинамических режимов и основных свойств рассеяния загрязняющих веществ в реальных горных ущельях, а также осуществлять реалистичные прогнозы на основе идеализированных моделей.

Ключевые слова: горное ущелье, пыль, хвостохранилище, математическая модель, аэродинамика.

Для цитирования: Каменецкий Е.С., Радионов А.А. Математическое моделирование аэродинамики идеализированных горных ущелий. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 174-190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

Original paper

Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere

E.S. Kamenetsky , A.A. Radionoff 

Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
53 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation,
e-mail: aar200772@mail.ru

Received: 04.06.2024, revised: 06.09.2024, accepted: 07.09.2024

Abstract: Relevance. In mountainous areas there are tailing dumps that contain “tailings” – waste from mining plants, from where the tailings enter the atmosphere of mountain gorges in the form of fine dust. Multifactorial air flows and complex patterns of pollutant distribution in mountain gorges determine the need to study each specific gorge separately. The study of mountain gorges of an idealized shape is convenient to use for a detailed analysis of atmospheric flows in practically important applied problems of monitoring aerodynamics and the propagation of pollutants in real gorges. **Methods.** Using mathematical modeling, three-dimensional isothermal atmospheric flows in a mountain gorge with an idealized geometric shape in the form of a rectangular cavern oriented from south to north are considered. **The aim** is to study the influence of the width to height ratio of a mountain gorge and compare the results of model calculations with the model of the Alagir mountain gorge, North Ossetia-Alania, Russian Federation. **Results.** It is shown that when the width to height ratio is greater than three, the mountain gorge belongs to the comparable “wide” gorge. Analysis of the aerodynamic properties of the Alagir mountain gorge allows us to conclude that at the location of the Unal tailings dump this gorge corresponds to wide gorges. This conclusion can be drawn from the correspondence of the wind roses of these gorges and from the approximate correspondence of unsteady flow regimes depending on the direction of the external wind. Wind roses, profiles of wind speed, frequencies and amplitudes of unsteady oscillations, the distribution of dust concentration from the pollutant source as a marker of flow regimes are shown for idealized gorges of different widths. Knowledge of the air flows in idealized mountain gorges allows us to conduct a more in-depth analysis of aerodynamic regimes and the basic properties of pollutant dispersion in real mountain gorges and make realistic forecasts based on idealized models.

Keywords: mountain gorge, dust, tailings dump, mathematical model, aerodynamics.

For citation: Kamenetsky E.S., Radionoff A.A. Numerical study of the idealized mountain gorges atmosphere. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 174-190. DOI: 10.46698/r8904-0498-0722-u

Введение

В горных территориях существенным климатическим фактором является горно-долинная циркуляция, которая возникает в результате нагрева горных склонов в дневное и охлаждения в ночное время. Горно-долинная циркуляция обусловлена термическими ветрами и в наиболее развитом виде проявляется в антициклонических условиях при чистом небе и в безветренных условиях. Как правило, при горно-долинной циркуляции потоки с равнины на гору происходят в дневное время, а потоки с гор на равнину – в ночное время. При наличии внешнего барического ветра горно-долинная циркуляция существенно усложняется и даже вблизи поверх-

ности характеризуется многофакторными течениями воздуха [Барри, 1984; Шелковников, 1985].

Научное изучение горных ветров и горно-долинной циркуляции решает несколько важных прикладных задач: 1) оперативное прогнозирование погоды в горах; 2) климатологическая характеристика горных территорий (например, для сельскохозяйственных целей); 3) оценка воздействия на горные поселения или инфраструктуру рекреационных центров. Горно-долинная циркуляция влияет на: распределение температуры воздуха над сложной подстилающей поверхностью [Барри, 1984; Lindkvist et al., 2000; Mahrt, 2006]; перенос и распространение дыма и пыли хвостохранилищ [Каменецкий и др., 2020]; образование и рассеивание тумана [Suxart et al., 2011]; морозоустойчивость сельскохозяйственных культур; безопасность наземного транспорта и полетов воздушных судов [Шелковников, 1985]; длительное выветривание; климатические условия; пожарную безопасность [Sharples, 2009].

Получению достоверных результатов в области горной метеорологии препятствует уникальность климатических характеристик каждого конкретного ущелья. Действительно, каждое ущелье характеризуется своей пространственной конфигурацией, свойствами поверхности, увлажненностью и другими параметрами. Следовательно, любое измерение метеорологических полей или проведенный численный эксперимент для конкретной метеорологической ситуации в горном ущелье, не позволяет сделать выводы для ситуаций вне пределов рассмотренного случая. Это препятствие преодолевается двумя путями: 1) объединение реальных случаев в группы по сходным формам рельефа и обобщение аэродинамики этих случаев относительно присущих им важных физических процессов; 2) численное моделирование геометрически простых или идеализированных случаев для исследования основных аэродинамических свойств. Эти подходы позволяют, не прибегая к ресурсоёмкому моделированию, учитывающему детальные свойства поверхности, или дорогостоящим измерениям, делать некоторые выводы в области горной метеорологии.

Для процессов тепло- и массопереноса в идеализированных горных ущельях получено несколько важных результатов. В обзоре [Teixeira et al., 2016] показано, что в атмосфере горного ущелья с неравномерно нагретыми солнечным излучением склонами возникают сложные циркуляционные течения воздуха, содержащие от двух до четырех и более вихрей с горизонтальной осью вращения в поперечном сечении ущелья. Количество вихрей зависит от ширины ущелья и его географической ориентации. Зависимость от ширины ущелья рассматривается в [Wagner et al., 2015a; Serafin, Zardi, 2010], где показана трансформация потока при изменении ширины ущелья. В работе [Wagner et al., 2015b] получено, что при сужении ущелья сила ветра внутри поперечного сечения ущелья увеличивается, что приводит к увеличению вертикального массообмена в 1,8–2,8 раза, а учет наклона вдоль оси ущелья увеличивает вертикальный обмен примерно в 1,2 раза.

В работе [Lang et al., 2015] рассматривается горное ущелье с разновысокими склонами и начальным горизонтальным участком, найдено, что для глубокого внутреннего ущелья режим обратного циркуляционного течения устанавливается на большей части поперечного сечения ущелья. В расположенных не строго с востока на запад горных ущельях, солнечная радиация различается по времени и величине для разных склонов ущелья, что приводит к соответствующим пространственно-

временным изменениям поверхностных тепловых потоков, которые, в свою очередь, приводят к существенным трансформациям структуры потока и переноса загрязняющих веществ (ЗВ) [Matzinger et al., 2003; Rotach et al., 2008; Gohm et al., 2009].

Метеорологические измерения процессов разрушения ночной инверсии в атмосфере глубокого горного ущелья представлены в работе [Whiteman, 1982]. В работах [Leukauf et al., 2015; Leukauf et al., 2017; Lehner et al., 2017] моделируется разрушение ночной инверсии в горных ущельях при солнечном нагреве в утренние и дневные часы и исследуется зависимость этого процесса от параметров солнечного излучения (варьировалась коротковолновая солнечная радиация, соответствующая поверхностному тепловому потоку от 50 до 450 Вт/м²). Минимальное значение теплового потока, необходимого для разрушения ночной инверсии, составило порядка 150 Вт/м²; зависит от геометрии ущелья и при больших значениях этого параметра атмосфера горного ущелья полностью перестраивается три раза за сутки. Показано, что обмен энергией и массой между долиной и атмосферой сильно зависит от этого параметра. В этих исследованиях предполагалась низкая влажность поверхности склонов, не учитывалось испарение влаги и образование облаков.

Исследование атмосферных процессов в идеализированном Аризонском метеоритном кратере в двумерной [Lehner et al., 2016] и трехмерной [Lehner, Whiteman, 2014] постановке посвящено моделированию возникновения термически-обусловленных ветров, а также их взаимодействия с катататическими склоновыми ветрами. Исследуется модельная зависимость течения от геометрических размеров кратера, показаны сложные картины течений, включающие струйные течения, сложные процессы разрушения температурной инверсии, образования волн над бассейном кратера с одним или двумя гребнями. Более подробный обзор других результатов моделирования горной метеорологии представлен в [Whiteman, 2000; Chow et al., 2013].

В горных территориях расположены хвостохранилища, в которых, часто открытым способом, содержатся «хвосты» – отходы деятельности горнодобывающих комбинатов, откуда в виде мелкой пыли хвосты попадают в атмосферу горных ущелий. В летнее время, при солнечном нагреве и заметном ветре, пыление хвостохранилища протекает активно – при 5 м/с пыление хвостов значительно, а при скорости ветра более 8 м/с этот процесс еще более интенсифицируется (Электронный ресурс EPA. Iron King Mine and Humboldt Smelter. 2010. URL: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, дата обращения 09.10.2019), [Gillies, 2013; Kok et al., 2014]. Результатом является перемещение химических элементов по склонам горных ущелий, что важно учитывать при оценке ландшафтно-геохимической миграции элементов в природной среде и оценке экологических рисков для данной территории.

Содержание химических элементов и их распределение на склонах горных ущелий изучаются при помощи полевых измерений [Гурбанов и др., 2019, 2020; Лолаев и др., 2017а, 2017б] в горных территориях РСО-Алания. Математическое моделирование применяется для описания распространения пылевого аэрозоля от Унальского хвостохранилища, расположенного в Алагирском ущелье, и Фиагдонского хвостохранилища, расположенного в Куртатинском ущелье, РСО-Алания, РФ [Каменецкий и др., 2020, 2022]. Отмечаются сложные трехмерные течения возду-

ха в Алагирском и Куртатинском ущельях. За горными вершинами возникают нестационарные трехмерные вихри, формируются направленные вдоль оси ущелья струйные течения. ЗВ распространяются преимущественно не вдоль внешнего потока, а увлекаются областями с сильной турбулентностью и уносятся струйными течениями в боковые рукава горных ущелий и там рассеиваются. Сопоставление результатов математической модели с данными измерений наземных метеостанций и спутниковыми данными зондирования атмосферы Земли показывает удовлетворительные результаты.

Если источник ЗВ, расположенный в горном ущелье действует длительное время, несколько десятков лет, суточные изменения аэродинамики горного ущелья при горно-долинной циркуляции частично компенсируются и не являются доминирующим процессом. Это позволяет, используя приближение нейтральной стратификации, упростить постановку задачи и учитывать только основные факторы, влияющие на перенос ЗВ, такие как топография горной местности, турбулентность, роза ветров. В результате, с использованием упрощенных идеализированных моделей, получается удовлетворительный прогноз для реальных задач.

Изучение горных ущелий идеализированной формы удобно использовать для подробного анализа атмосферных течений в практически важных прикладных задачах мониторинга аэродинамических характеристик и распространения ЗВ в реальных ущельях. В данной работе рассматриваются трехмерные изотермические течения атмосферы в горном ущелье с идеализированной геометрической формой в виде прямоугольной каверны, ориентированной с юга на север. Изучается влияние отношения ширины горного ущелья к его высоте, найдено, что этот параметр является одним из определяющих для аэродинамики горного ущелья. Показаны розы ветров, характерные профили скорости ветра в поперечном сечении ущелья, частоты и амплитуды возникающих осцилляций при разных направлениях внешнего ветра, а также распределения концентрации примеси от источника, расположенного на дне ущелья, как маркера режимов течения.

Математическая модель

Горное ущелье идеализированного профиля выбиралось длиной 40 км (по оси Oy) прямоугольного сечения размером 1×1 км, $1,5 \times 1$ км, 2×1 км, $2,5 \times 1$ км, 3×1 км, 4×1 км (в плоскости xz) в виде закрытой со всех сторон каверны. Граничные условия на боковых границах ставились на удалении не менее 15 км от каждого края каверны, что позволяет считать влияние граничных условий на течение внутри каверны не существенным. Верхнее граничное условие ставилось на высоте 4 км над дном каверны, что также позволяет надеяться, что оно не влияет на течение внутри каверны. Перепад давления, под действием которого поддерживается внешний ветер, задавался в виде градиента давления на входной и выходной границах, соответствующего геострофическому балансу. Источник ЗВ располагался вблизи дна каверны, приблизительно посередине поперечного сечения по длине и ширине.

Количество узлов сетки: 100 узлов по направлению Ox , из них 20 в области каверны; 340 узлов по направлению Oy , из них 300 в области каверны; 50 узлов по направлению Oz , из них 25 внутри каверны. Расстояния: длина каверны 40 км, горизонтальные участки вокруг каверны 10 км, высота каверны 1000 м, высота расчетной области над каверной 3000 м. Схематично вычислительную сетку иллюстрирует рис. 1, где показаны направления координатных осей и размеры ущелья.

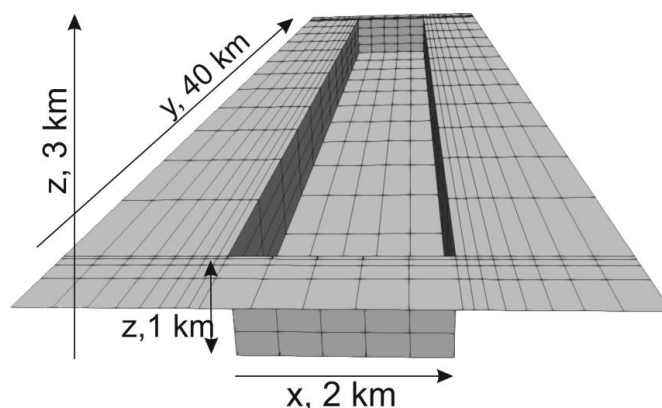


Рис. 1. Схематичное представление вычислительной области для ущелья шириной 2 км /
 Fig. 1. Schematic representation of the computational domain for the gorge 2 km wide

Использовался солвер « *pisoFoam* » пакета OpenFOAM (<https://openfoam.org/release/7/>), предназначенный для описания нестационарных течений несжимаемой жидкости, в котором реализовано решение уравнений движения. Уравнения движения в приближении Буссинеска:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla(\mu \cdot \nabla \vec{v}) + \vec{f} \times \vec{v}.$$

В правой части уравнений движения добавлено слагаемое $\vec{f} \times \vec{v}$, где $\vec{f} = (0, 0, 2\Omega \sin \varphi)$ – вектор параметра Кориолиса; ∇ – оператор «набла»; ρ – плотность; p – давление, вычисляемое по алгоритму PISO [Issa, 1986]; \vec{v} – вектор скорости ветра, $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$ 1/с – частота вращения Земли, φ – географическая широта. Добавлено уравнение для расчета концентрации ЗВ [Каменецкий и др., 2020]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) c = \nabla(\mu \cdot \nabla c) + S,$$

где $S=I$ – нормированный источник ЗВ вблизи поверхности ущелья; c – концентрация ЗВ; координата x направлена на восток, y – на север, z – вверх; t – время; μ – турбулентная вязкость воздуха, рассчитываемая по $(k-\epsilon)$ -модели, параметры которой принимались согласно работе [Hargreaves, Wright, 2007], использовалось RAS-моделирование турбулентности.

На верхней границе скорость ветра определяется балансом между силой Кориолиса и перепадом давления, связанным с течениями воздуха синоптического масштаба. Граничное условие для скорости на верхней границе задавалось константой, на входных боковых границах согласно решению Экмана. Для выходных боковых границ расчетной области задавались градиенты скорости равные нулю (*fixedGradient*). На нижней границе использовано условие прилипания и нулевой градиент давления. Пыль моделировалась одной фракцией, для пылинок которой характерна скорость осаждения $w_n \approx 10^{-4}$ м/с, что соответствует размеру частиц от 2 до 10 микрон.

В расчетах геострофический баланс достигается за время 12000 с. Представленные в этой работе результаты расчетов показаны для момента времени 21600 с. Такого времени расчета достаточно для появления нестационарных режимов течения в ущелье с периодической генерацией вихрей и установления поля концентрации ЗВ.

Проведены шесть серий вычислительных экспериментов для шести ущелий, которые различаются шириной, при модуле скорости внешнего ветра, равном 10 м/с. Для ущелья каждой ширины проведено 16 расчетов с различными направлениями ветра на внешней границе, которые отличались поворотом на 22,5 градусов в горизонтальной плоскости при остальных неизменных параметрах. Результаты всех 16-ти расчетов анализировались совместно: строилась модельная роза ветров, строилось осредненное поле концентрации ЗВ, анализировались нестационарные режимы течения, их частоты и амплитуды, исследовались струйные течения.

Результаты и обсуждение

Розы ветров

Аэродинамика течений в горном ущелье находит свое отражение в розе ветров, удобство моделирования которой в том, что ее можно сравнить с натурными измерениями, поскольку она зачастую измеряется метеостанциями. Роза ветров характеризует наиболее часто повторяющиеся направления ветра в данной точке поверхности ущелья. При измерениях на метеостанциях роза ветров является результатом обработки ежедневных измерений направления ветра за большой промежуток времени практически всегда для одной точки поверхности горного ущелья, в которой располагается метеостанция. При построении из результатов математической модели роза ветров строится по всем точкам вычислительной сетки, принадлежащим некоторой площади поверхности ущелья, для всех 16-ти расчетов с различными направлениями внешнего ветра. Это различие оказывает свое влияние на точность предсказаний модели, найдено удовлетворительное соответствие модельных и измеренных роз ветров для двух точек Алагирского ущелья [Каменецкий и др., 2022].

На рис. 2а-2в показаны модельные розы ветров для идеализированных ущелий разной ширины и соответствующие силы ветров, пунктирной линией приведена измеренная роза ветров в Алагирском ущелье вблизи Унальского хвостохранилища. Область поверхности, по которой строилась модельная роза ветров, выбиралась в центре ущелья (вблизи источника ЗВ), вычислялась по всей ширине идеализированного ущелья (ось Ox), вдоль оси Oy составляла расстояние равное ширине ущелья, а для Алагирского ущелья область поверхности выбиралась вблизи источника ЗВ.

Роза ветров для широких ущелий (рис. 2б, 2с) близка розе ветров, измеренной вблизи Унальского хвостохранилища Садонского СЦК, расположенного в Алагирском ущелье, которое в точке измерения ориентировано практически с юга на север [Каменецкий и др., 2022]. Обе розы ветров напоминают арабскую цифру «8», ориентированную вдоль оси ущелья. В направлении перпендикулярном оси ущелья ветров практически не наблюдается, что показывают и измерения в реальном Алагирском ущелье, и моделирование широкого ущелья идеализированного профиля.

Измеренная в Алагирском ущелье роза ветров демонстрирует общие черты, как с модельной розой ветров для узкого ущелья (рис. 2а) при южных и юго-западных ветрах, так и с розой ветров, построенной для широкого ущелья (рис. 2б) при северных и северо-восточных ветрах. Можно предположить, что форма пунктирной линии на рис. 2 отражает геометрию Алагирского ущелья, которое несколько расширяется на север вблизи точки измерения, а в южном направлении несколько сужается.

В более узких ущельях (рис. 2а) роза ветров также показывает отсутствие ветров в направлении перпендикулярном оси ущелья. Однако форма розы ветров бо-

лее сложная, появляются ветра, направленные под большим углом к оси ущелья и нет ярко выраженных двух преобладающих направлений, как в случае широких ущелий.

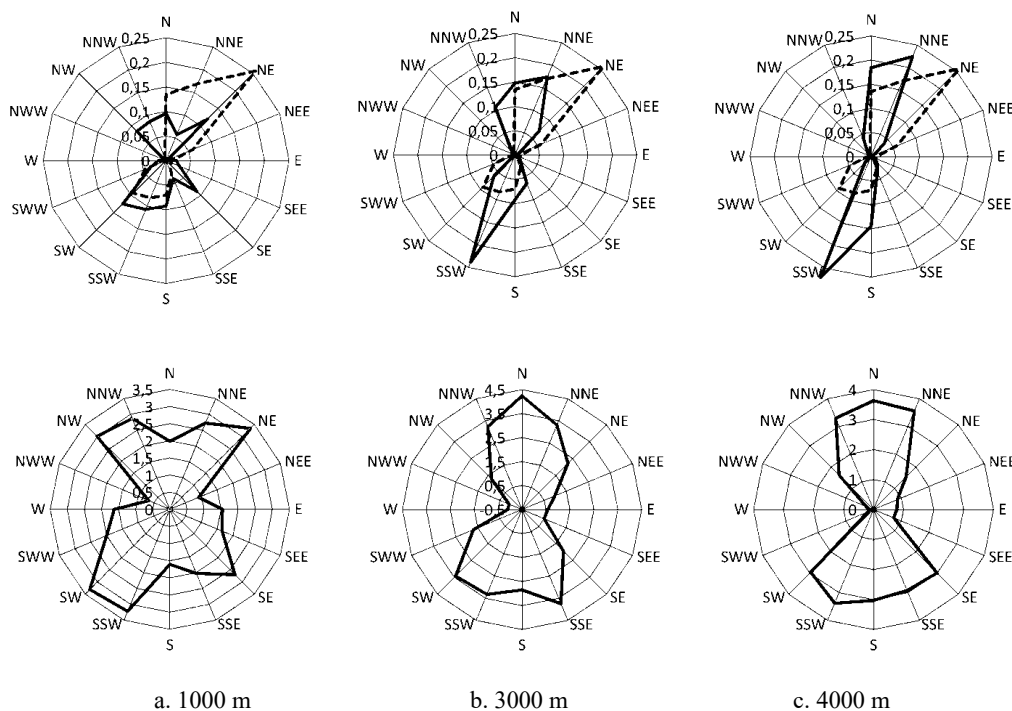


Рис. 2. Приземные розы ветров (сверху) и сила ветров (снизу) в центре ущелья в точке, где расположен источник ЗВ. Ширина ущелья указана на рисунке внизу. Значения получены по серии из 16-ти расчетов для каждого ущелья /

Fig. 2. Surface wind roses (top) and wind strength (bottom) in the center of the gorge at the point where the pollutant source is located. The width of the gorge is indicated at the bottom of each figure. The values are obtained from series of 16 simulations for each gorge

Струйные течения

В случае если внешний ветер имеет восточную или западную компоненту, внутри горного ущелья формируется струйное течение, которое, при некоторых направлениях внешнего ветра является нестационарным. Спиральный вихревой поток воздуха внутри ущелья усложняется, и периодически появляются вихри, вращающиеся с горизонтальной осью вращения вдоль оси Ox , тогда как ось основного вихря в ущелье ориентирована вдоль оси Oy . Характерный размер вдоль оси Oy таких вихрей составляет 1–2 ширины ущелья. В результате возникает сложная, нестационарная картина течения, в которой крупные вихри движутся внутри ущелья вдоль его оси медленнее внешнего ветра.

Пример нестационарного струйного течения вдоль ущелья иллюстрируется на рис. 3, где показаны профили направленной вдоль оси ущелья северной компоненты скорости ветра, для случая расчета северо-восточно-восточного внешнего ветра. Показаны три профиля, демонстрирующих изменения во времени, которые происходят при прохождении вихря с осью вращения вдоль оси Ox (восточное направление): штрих-пунктирная кривая – центр вихря, сплошная кривая – край вихря, пунктирная штриховая кривая – приблизительно между вихрями. Сечение взято в середине ущелья.

Видно, что при прохождении вихря профиль скорости ветра существенно меняется в области отрицательных высот – внутри ущелья (рис. 3). Внутри ущелья формируется горизонтально направленная струя, которая в этом расчете пульсирует, с периодом около 260 сек и амплитудой более 2 м/с. Это относительно большие пульсации, которые существенно влияют на перенос ЗВ и приводят к образованию клубов пыли, распространяющихся на заметные расстояния.

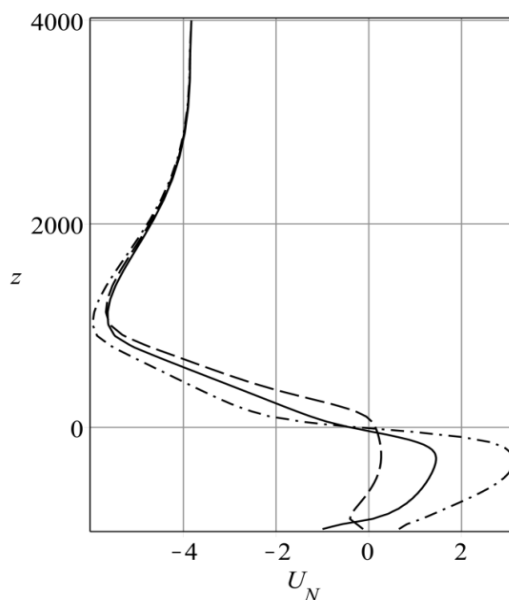


Рис. 3. Профили северной компоненты U_N скорости ветра в разных сечениях вихря. Расчет при северо-восточно-восточном внешнем ветре, ущелье шириной 1500 м, время 21600 сек /

Fig. 3. Profiles of the northern component U_N of wind speed in different sections of the vortex. The simulation for the north-east-east external wind, gorge 1500 m wide, time 21600 sec

Нестационарное течение в ущелье формируется не для всех направлений внешнего ветра. Зависимость частоты и амплитуды пульсаций в струйном течении от направления внешнего ветра для разных ущелий показана на рис. 4. На этом же рис. 4 пунктиром приведены частоты и амплитуды пульсаций, вычисленные для Алагирского ущелья в точке, где расположено Унальское хвостохранилище.

Не в каждом расчетном случае легко определяется основная частота пульсации, поскольку зависимость от времени течения зачастую сложная, не всегда строго периодичная. Частота на графиках рис. 4 определялась для каждого расчета на основании анализа временного ряда, в котором выделялись наиболее амплитудные периодические пульсации.

Анализ рис. 4 позволяет полагать, что наилучшее соответствие частот и амплитуд пульсаций для Алагирского ущелья в точке расположения Унальского хвостохранилища достигается для ущелья идеализированного профиля шириной 4000 м. Для более узких ущелий наблюдается два выделенных направления (приблизительно северо-восточное и юго-западное), в которых амплитуды пульсаций значительны. Рис. 3 иллюстрирует осцилляции для идеализированного ущелья шириной 1500 м. Амплитуда пульсаций достигает 2 м/с вблизи поверхности для ущелья шириной 1500 м при направлении внешнего ветра СВВ или ЮЗЗ, при этом период пульсаций составляет 5–6 мин, а средняя приземная скорость ветра – порядка 0,3–0,5 м/с.

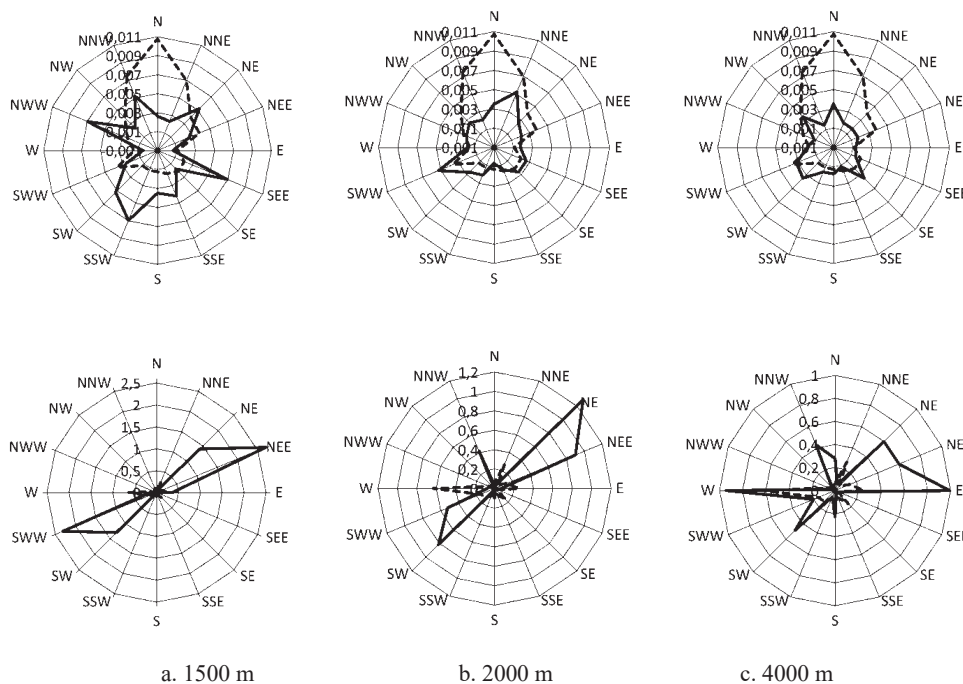


Рис. 4. Зависимость частоты (Гц, сверху) и амплитуды (м/с, внизу) пульсаций струйного течения от направления внешнего ветра. Ширина ущелья указана на рисунке внизу. Значения получены по серии из 16-ти расчетов для каждого ущелья /

Fig. 4. Dependence of the frequency (Hz, top) and amplitude (m/s, bottom) of jet stream pulsations on the direction of the external wind. The width of the gorge is indicated at the bottom of the figure. The values are obtained from series of 16 simulations for each gorge.

Струйные течения в поперечном сечении ущелья наблюдаются при всех направлениях ветра в ущельях. Их появление связано как с барическим градиентом, вызывающим стационарный внешний ветер, так и с формированием вихря внутри поперечного сечения ущелья с горизонтальной осью вращения. Внутри ущелья сила Кориолиса частично блокируется склонами ущелья, в результате под действием барического градиента внутри ущелья развивается струйное течение, направленное вдоль оси ущелья. При этом поток воздуха движется по спирали в этом вихревом (в поперечном сечении ущелья) и струйном (вдоль оси ущелья) течениях. Чем больше восточная или западная составляющая скорости внешнего ветра (и соответствующий барический градиент), тем более сильное струйное течение формируется вдоль оси ущелья.

Хотя причина формирования струйного течения понятна, но причину потери его устойчивости трудно установить при помощи численного моделирования. Одна из возможных причин – это возникновение сдвиговой неустойчивости струйного течения, однако частоты и амплитуды осцилляций нестационарных режимов зависят от ширины ущелья (рис. 3, 4), осцилляции проявляются только при нескольких направлениях скорости внешнего ветра и их характеристики зависят от значения скорости ветра на внешней границе.

Концентрация ЗВ как маркер режимов течения

Аэродинамика горного ущелья отражается на процессах переноса ЗВ в атмосфере горного ущелья. Во многих случаях удобно использовать расчетное поле концентрации ЗВ как маркер, отражающий основные режимы течения воздуха.

Серия вычислительных экспериментов показывает зависимость течений воздуха в ущелье идеализированной прямоугольной формы в зависимости от ширины. В узких ущельях рассеяние ЗВ от модельного источника происходит значительно интенсивнее, чем в широких ущельях (рис. 5, 6). Количественное отношение интенсивности рассеяния пыли в узких ущельях к широким, составляет порядка 3 и более, что соответствует результатам работы [Wagner, et al., 2015a]. Ширина горного ущелья, при которой происходит изменение режима интенсивного перемешивания на менее интенсивный, составляет порядка 3000 м. Другими словами, в ущельях с отношением ширины к высоте менее чем 3 наблюдается интенсивное рассеяние ЗВ, в несколько раз большее, чем в относительно широких ущельях с отношением ширины к высоте более 3.

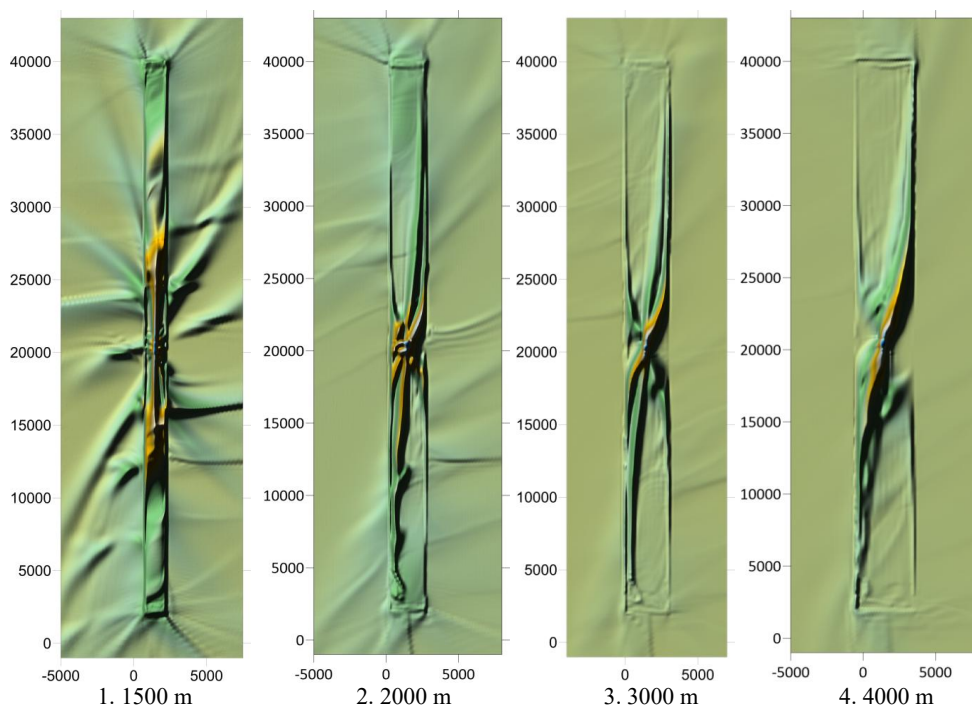


Рис. 5. Среднее поле ЗВ по серии из 16-ти расчетов для 4-х ущелий /

Fig. 5. The average pollutant field for series of 16 calculations for 4 gorges

Распределение концентрации ЗВ вдоль оси ущелья также отличается для узких и широких ущелий (рис. 5, 6). В узких ущельях ЗВ интенсивнее перемешиваются внутри ущелья, и это перемешивание еще более усиливается с увеличением скорости ветра на внешней границе.

Отмеченные ранее различия в розах ветров для узких и широких ущелий также просматриваются и в распределениях ЗВ по дну ущелья (рис. 5). Для широких ущелий форма распределения ЗВ по поверхности дна, практически симметричная относительно источника, хорошо соответствует форме розы ветров с двумя выделенными направлениями. Для более узких ущелий распределение ЗВ связано с интенсивными вихревыми режимами течения, и подобного соответствия не просматривается.

На рис. 5 показано четыре средних поля приземных концентраций ЗВ, вычисленных для ущелий разной ширины. Каждое изображение является прогнозом значений концентрации ЗВ по склонам модельного ущелья. Поскольку ЗВ переносятся

в основном ветром, то распределение ЗВ по склонам ущелья отражает наиболее часто дующие ветра в точке расположения источника.

Для широких ущелий видно (рис. 5), что повышенные значения ЗВ расположены вдоль оси ущелья с несколько отклоняющейся линией максимальных значений от направления оси ущелья. Это распределение соответствует вычисленным приземным розам ветров на основании 16-ти расчетов для каждого ущелья (рис. 2, 5).

На рис. 6 показано распределение концентрации ЗВ вдоль оси ущелья, полученное для центрального сечения, проходящего через точку, в которой расположен источник ЗВ для ущелий шириной 1500 м и 3000 м, вычисленное для момента времени 21600 с.

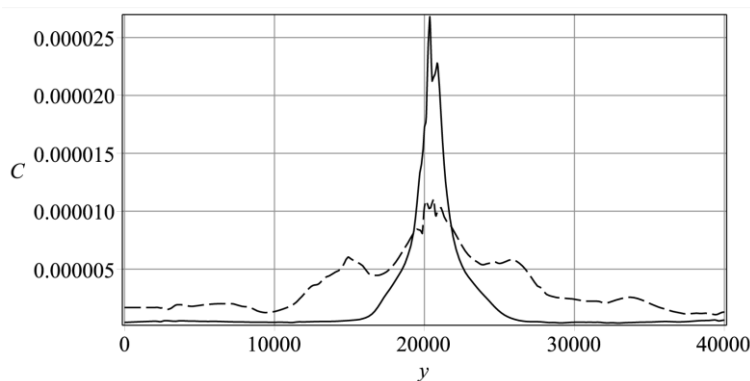


Рис. 6. Распределение ЗВ вдоль оси для ущелья шириной 1500 м (пунктирная линия) и шириной 3000 м (сплошная линия), получено на основании среднего по 16-ти расчетам поля ЗВ, при 10 м/с на внешней границе /

Fig. 6. Distribution of pollutant along the axis for a gorge 1500 m wide (dashed line) and 3000 m wide (solid line), obtained from 16 simulations of the pollutant field, at 10 m/s at the top boundary

Из рис. 6 видно, что концентрация ЗВ на дне узких ущелий заметно выше, чем для широких ущелий. Например, в ущелье 1000 м шириной вблизи южного уступа приземная концентрация ЗВ составляет $2,5 \times 10^{-6}$, а для широкого ущелья 4000 м шириной это значение составляет $3,0 \times 10^{-7}$ при одинаковой длине ущелья. Другими словами, нестационарные режимы течения, возникающие в узких ущельях, переносят ЗВ вдоль ущелья гораздо интенсивнее, чем в широких ущельях. Это связано с более интенсивными явлениями турбулентности и образования крупных вихрей в узких ущельях. При этом пиковое значение концентрации ЗВ вблизи источника в широких ущельях выше, чем в узких ущельях (рис. 6).

С увеличением расстояния от источника вдоль оси ущелья концентрация ЗВ в узких ущельях уменьшается гораздо медленнее, чем это происходит в широких ущельях. Кроме того, уменьшение концентрации ЗВ с увеличением расстояния от источника происходит неравномерно в узких ущельях. На рис. 6 заметны максимумы концентрации ЗВ на сплошной кривой. Эти максимумы связаны с влиянием нестационарных вихрей, возникающих в узких ущельях. Расстояние этих максимумов от источника ЗВ увеличивается с увеличением ширины ущелья. Если для ущелья шириной 1000 м наблюдается несколько таких максимумов, то для ущелья шириной 2000 м наблюдается только два таких максимума. Для более широких ущелий максимумов не наблюдается, максимальные значения концентрации ЗВ располагаются не строго на оси ущелья, а под некоторым углом (рис. 5).

Выводы

Изучение течений воздуха в идеализированных горных ущельях без учета влияния тепловых процессов и влажности позволяет понять основные закономерности формирования таких течений.

Показано, что структура течения в узких горных ущельях (с небольшим отношением ширины к высоте) заметно отличается от полученной для широких ущелий. В частности, заметно отличаются розы ветров, в узких ущельях в некоторых вариантах расчетов возникает пульсирующее нестационарное течение, причем пульсации не затухают во времени.

ЗВ заполняют все поперечное сечение узкого ущелья, и перенос ЗВ является более интенсивным.

Сравнение результатов расчетов для Алагирского ущелья с результатами для идеализированных горных ущелий показывает, что идеализация формы поперечного сечения ущелья не меняет качественной картины течения воздуха и результаты, полученные для идеализированных ущелий, могут переноситься на реальные ущелья с приемлемой точностью.

Литература

1. Барри Р.Г. Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 311 с.
2. Гурбанов А.Г., Лескин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Дзебоев С.О. Оценка масштабов и степени негативного воздействия Фиагдонского хвостохранилища на экосистему. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2020. – Т. 20. № 2. – 2020. – С. 54–62. DOI: 10.46698/d5387-0147-5683-х.
3. Гурбанов А.Г., Лексин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А. Б., Оганесян А.Х., Дзебоев С.О. Закономерности в характере распределения содержаний макро- и микроэлементов в поверхностном слое (0.6 м) Фиагдонского хвостохранилища. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2019. – Т. 19. № 4. – С. 51–59. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.43324.
4. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С., Свердлик Г.И. Математическое моделирование распределения пыли по склонам горного ущелья от хвостохранилища, расположенного в Алагирском ущелье. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №№ 11-1. – С. 118–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-118-134.
5. Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Тимченко В.Ю., Панаэтова О.С. Математическое моделирование распределения химических веществ и твердой фазы хвостов, осаждающихся на горных склонах в районе Фиагдонского хвостохранилища РСО-Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 3. – С. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361.
6. Лолаев А.Б., Бадтиев Б.П., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Определение консолидационных характеристик хвостов намывных техногенных месторождений. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017а. – Т. 9. № 4. – С. 355–361.
7. Лолаев А.Б., Гурбанов А.Г., Дзебоев С.О., Илаев В.Э. Загрязнение прилегающих территорий в районе деятельности Садонского свинцово-цинкового комбината (Республика Северная Осетия-Алания). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2017б. – Т. 6. № 2. – С. 177–180.
8. Шелковников М. С. Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 208 с.
9. Chow F.K., De Wekker S.F.J., Snyder B.J. Mountain Weather Research and Forecasting. Dordrecht. Springer. 2013. 750 p. DOI: 10.1007/978-94-007-4098-3.

10. Cuxart J., Cunillera J., Jimenez M.A., Martínez D., Molinos F., Palau J.L. Study of mesobeta basin flows by remote sensing. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2011. – Vol. 143. – pp. 143–158. DOI: 10.1007/s10546-011-9655-8.
11. Gillies J.A. Fundamentals of aeolian sediment transport: dust emissions and transport – near surface. *Environmental Science, Geology*. – 2013. – Vol. 11. Issue 4. – pp. 43–63. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00297-9.
12. Gohm A., Harnisch F., Vergeiner J., Obleitner F., Schnitzhofer R., Hansel A., et al. Air pollution transport in an alpine valley: results from airborne and ground-based observations. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2009. – Vol. 131. – pp. 441–463. DOI: 10.1007/s10546-009-9371-9.
13. Hargreaves D.M., Wright N.G. On the use of the k-Epsilon model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. // *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. – 2007. – Vol. 95. Issue 5. – pp. 355–269.
14. Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. // *Journal of Computational Physics*. – 1986. – Vol. 62. Issue 1. – pp. 40–65. DOI: 10.1016/0021-9991(86)90099-9.
15. Kok J.F., Mahowald N.M., Fratini G., Gillies J.A., Ishizuka M., Leys J.F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R.S., Zobeck T.M. An improved dust emission model – Part 1: Model description and comparison against measurements. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. Issue 23. – pp. 13023–13041. DOI: 10.5194/acp-14-13023-2014.
16. Lang M.N., Gohm A., Wagner J.S. The impact of embedded valleys on daytime pollution transport over a mountain range. // *Atmospheric chemistry and physics, Discussions*. – 2015. – Vol. 15. – pp. 14315–14356. DOI: 10.5194/acpd-15-14315-2015.
17. Lehner M., Whiteman C.D. Physical mechanisms of the thermally driven cross-basin circulation. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2014. – Vol. 140. Issue 680. – pp. 895–907. DOI: 10.1002/qj.2195.
18. Lehner M., Rotunno R., Whiteman C.D. Flow Regimes over a Basin Induced by Upstream Katabatic Flows-An Idealized Modeling Study. // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – Vol. 73. pp. 3821–3842. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0114.1.
19. Lehner M., Whiteman C.D., Dorninger M. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2017. – Vol. 163. – pp. 497–522.
20. Leukauf D., Gohm A., Rotach M.W., Wagner J.S. The impact of the temperature inversion breakup on the exchange of heat and mass in an idealized valley: sensitivity to the radiative forcing. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2015. – Vol. 54. – pp. 2199–2216. DOI: 10.1175/jamc-d-15-0091.1.
21. Leukauf D., Gohm A., Rotach M. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2017. – Vol. 56. Issue 10. – pp. 2711–2727. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0378.1.
22. Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. A frost assessment method for mountainous areas. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2000. – Vol. 102. – pp. 51–67.
23. Mahrt L. Variation of surface air temperature in complex terrain. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2006. – Vol. 45. – pp. 1481–1493.
24. Matzinger N., Andretta M., van Gorsel E., Vogt R., Ohmura A., Rotach M.W. Surface radiation budget in an Alpine valley. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2003. – Vol. 129. – pp. 877–895. DOI: 10.1256/qj.02.44.
25. Rotach M.W., Andretta M., Calanca P., Weigel A.P., Weiss A. Boundary layer characteristics and turbulent exchange mechanisms in highly complex terrain. // *Acta Geophysicae*. – 2008. – Vol. 56. – pp. 194–219. DOI: 10.2478/s11600-007-0043-1.
26. Serafin S., Zardi D. Daytime heat transfer processes related to slope flows and turbulent convection in an idealized mountain valley. // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2010. – Vol. 67. – pp. 3739–3756. DOI: 10.1175/2010JAS3428.1.

27. Sharples J.J. An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. // *International Journal of Wildland Fire*. – 2009. – Vol. 18. – pp. 737–754.
28. Teixeira M.A.C., Kirshbaum D.J., Olafsson H., Sheridan P.F., Stiperski, I., et al. The atmosphere over mountainous regions. Switzerland: Frontiers Media SA, 2016. – 162 p.
29. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. The impact of valley geometry on daytime thermally driven flows and vertical transport processes. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2015a. – Vol. 141. Issue 690. – pp. 1780–1794. DOI: 10.1002/qj.2481.
30. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. Influence of along-valley terrain heterogeneity on exchange processes over idealized valleys. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015b. – Vol. 15. Issue 12. – pp. 6589–6603.
31. Whiteman C.D. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys. Part I: observations. // *Journal of Applied Meteorology*. – 1982. – Vol. 21. – pp. 270–289.
32. Whiteman C.D. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. NY: Oxford University Press, 2000. – 376 p.

References

1. Barry R.G. *Weather and climate in the mountains*. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1984. 311 p. (In Russ.)
2. Gurbanov A.G., Leskin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Dzeboev S.O. Assessment of the scale and degree of the negative impact of the Fiagdon tailings dump on the ecosystem. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2020. Vol. 20. No. 2. pp. 54–62. DOI: 10.46698/d5387-0147-5683-x. (In Russ.)
3. Gurbanov A.G., Leksin A.B., Gazeev V.M., Gurbanova O.A., Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Dzeboev S.O. Regularities in the nature of the distribution of macro- and microelements in the surface layer (0.6 m) of the Fiagdon tailings dump. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2019. Vol. 19. No. 4. pp. 51–59. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.43324. (In Russ.)
4. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S., Sverdlik G.I. Mathematical modeling of dust distribution along the slopes of a mountain gorge from a tailings dump located in the Alagir Gorge. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020. Nos. 11-1. pp. 118–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-118-134. (In Russ.)
5. Kamenetsky E.S., Radionoff A.A., Timchenko V.Yu., Panaetova O.S. Mathematical modeling of the distribution of chemicals and solid phase of tailings deposited on mountain slopes in the area of the Fiagdon tailings dump in North Ossetia-Alania. *Sustainable development of mountain territories*. 2022. Vol. 14. No. 3. pp. 349–361. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-349-361 (In Russ.)
6. Lolaev A.B., Badtiev B.P., Butyugin V.V., Badoev A.S. Determination of consolidation characteristics of tailings of alluvial technogenic deposits. *Sustainable development of mountain territories*. 2017. Vol. 9. No. 4. pp. 355–361. (In Russ.)
7. Lolaev A.B., Gurbanov A.G., Dzeboev S.O., Ilaev V.E. Pollution of adjacent territories in the area of activity of the Sadon lead-zinc plant (Republic of North Ossetia-Alania). *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Centre*. 2017. Vol. 6. No. 2. pp. 177–180. (In Russ.)
8. Shelkovnikov M.S. Mesometeorological processes in mountainous areas and their influence on aircraft flights. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1985. 208 p. (In Russ.)
9. Chow F.K., De Wekker S.F.J., Snyder B.J. *Mountain Weather Research and Forecasting*. Dordrecht. Springer. 2013. 750 p. DOI: 10.1007/978-94-007-4098-3.
10. Cuxart J., Cunillera J., Jimenez M.A., Martínez D., Molinos F., Palau J.L. Study of mesobeta basin flows by remote sensing. *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. Vol. 143. pp. 143–158. DOI: 10.1007/s10546-011-9655-8.
11. Gillies J.A. Fundamentals of aeolian sediment transport: dust emissions and transport – near surface. *Environmental Science, Geology*. 2013. Vol. 11. Issue 4. pp. 43–63. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00297-9.

12. Gohm A., Harnisch F., Vergeiner J., Obleitner F., Schnitzhofer R., Hansel A., et al. Air pollution transport in an alpine valley: results from airborne and ground-based observations. *Boundary-Layer Meteorology*. 2009. Vol. 131. pp. 441–463. DOI: 10.1007/s10546-009-9371-9.
13. Hargreaves D.M., Wright N.G. On the use of the k-Epsilon model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*. 2007. Vol. 95. Issue 5. pp. 355–269.
14. Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986. Vol. 62. Issue 1. pp. 40–65. DOI: 10.1016/0021-9991(86)90099-9.
15. Kok J.F., Mahowald N.M., Fratini G., Gillies J.A., Ishizuka M., Leys J.F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R.S., Zobeck T.M. An improved dust emission model – Part 1: Model description and comparison against measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. Issue 23. pp. 13023–13041. DOI: 10.5194/acp-14-13023-2014.
16. Lang M.N., Gohm A., Wagner J.S. The impact of embedded valleys on daytime pollution transport over a mountain range. *Atmospheric chemistry and physics, Discussions*. 2015. Vol. 15. pp. 14315–14356. DOI: 10.5194/acpd-15-14315-2015.
17. Lehner M., Whiteman C.D. Physical mechanisms of the thermally driven cross-basin circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2014. Vol. 140. Issue 680. pp. 895–907. DOI: 10.1002/qj.2195.
18. Lehner M., Rotunno R., Whiteman C.D. Flow Regimes over a Basin Induced by Upstream Katabatic Flows-An Idealized Modeling Study. *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – Vol. 73. pp. 3821–3842. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0114.1.
19. Lehner M., Whiteman C.D., Dorninger M. Inversion Build-Up and Cold-Air Outflow in a Small Alpine Sinkhole. *Boundary-Layer Meteorology*. 2017. Vol. 163. pp. 497–522.
20. Leukauf D., Gohm A., Rotach M.W., Wagner J.S. The impact of the temperature inversion breakup on the exchange of heat and mass in an idealized valley: sensitivity to the radiative forcing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. Vol. 54. pp. 2199–2216. DOI: 10.1175/jamc-d-15-0091.1.
21. Leukauf D., Gohm A., Rotach M. Towards generalizing the impact of surface heating, stratification and terrain geometry on the daytime heat export from an idealized valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. Vol. 56. Issue 10. pp. 2711–2727. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0378.1.
22. Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. Vol. 102. pp. 51–67.
23. Mahrt L. Variation of surface air temperature in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2006. Vol. 45. pp. 1481–1493.
24. Matzinger N., Andretta M., van Gorsel E., Vogt R., Ohmura A., Rotach M.W. Surface radiation budget in an Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2003. Vol. 129. pp. 877–895. DOI: 10.1256/qj.02.44.
25. Rotach M.W., Andretta M., Calanca P., Weigel A.P., Weiss A. Boundary layer characteristics and turbulent exchange mechanisms in highly complex terrain. *Acta Geophysicae*. 2008. Vol. 56. pp. 194–219. DOI: 10.2478/s11600-007-0043-1.
26. Serafin S., Zardi D. Daytime heat transfer processes related to slope flows and turbulent convection in an idealized mountain valley. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. pp. 3739–3756. DOI: 10.1175/2010JAS3428.1.
27. Sharples J.J. An overview of mountain meteorological effects relevant to fire behaviour and bushfire risk. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. pp. 737–754.
28. Teixeira M.A.C., Kirshbaum D.J., Olafsson H., Sheridan P.F., Stiperski, I., et al. The atmosphere over mountainous regions. Switzerland: Frontiers Media SA. 2016. 162 p.
29. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. The impact of valley geometry on daytime thermally driven flows and vertical transport processes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2015a. Vol. 141. Issue 690. pp. 1780–1794. DOI: 10.1002/qj.2481.

30. Wagner J.S., Gohm A., Rotach M.W. Influence of along-valley terrain heterogeneity on exchange processes over idealized valleys. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015b. Vol. 15. Issue 12. pp. 6589–6603.

31. Whiteman C.D. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys. Part I: observations. *Journal of Applied Meteorology*. 1982. Vol. 21. pp. 270–289.

32. Whiteman C.D. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. NY. Oxford University Press. 2000. 376 p.