

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 631.459.32

doi: 10.17072/2079-7877-2024-2-124-135

ПРОГНОЗ И ОЦЕНКА АРЕАЛА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЕТРОВОГО ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Жанна Юрьевна Кочетова¹, Олег Владимирович Базарский², Илья Сергеевич Лазарев³

^{1, 2, 3} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

¹ zk_vva@mail.ru, Scopus ID: 6507543337, РИНЦ Author ID: 354688, SPIN-код: 5866-5956

² arhangel'skaya49@mail.ru, РИНЦ Author ID: 140557, SPIN-код: 7490-4345

³ lazarev-ilya@list.ru, РИНЦ Author ID: 1108711, SPIN-код: 7511-5172

Аннотация. Ветровая эрозия почв является вторым после водной фильтрации фактором распространения загрязнителей. Существующие математические модели для оценки пространственного переноса загрязненных частиц атмосферным воздухом сложны и не применяются на практике из-за необходимости учета большого числа факторов. В работе адаптированы известные математические и эмпирические модели для описания полного цикла ветровой эрозии, включающего отрыв частиц от толщи почвы под действием ветра с критическими скоростями; подъем частиц в атмосферу на высоту их горизонтального переноса; седиментацию частиц из потока воздуха на различном расстоянии от источника, а также вероятность загрязнения почв свинцом при выпадении частиц различного радиуса. Проведенные расчеты получили экспериментальное подтверждение при оценке загрязнения территорий, прилегающих к реконструируемому аэродрому государственной авиации в г. Воронеже. При реконструкции склада горюче-смазочных материалов с извлечением подземных 60-тонных цистерн для хранения керосина было перемещено огромное количество грунта, десятилетиями фильтрующего опасные загрязнители. Расстояние переноса загрязненных частиц обычным ветром (со скоростью до 20 м/с) от неорганизованного источника пыления, согласно расчетам, может достигать 6,5 км. Максимальное загрязнение почв свинцом возможно на расстоянии до 500 м от источника пыления по направлению преобладающего ветра. Модель позволяет в первом приближении без сложных математических вычислений оценить ареал загрязнения почв вследствие переноса загрязненных частиц от неорганизованного источника пыления экологически опасных объектов при худшем сочетании климатических и географических условий.

Ключевые слова: математическая модель, ветровая эрозия, загрязнение почв, свинец, реконструкция аэродрома

Для цитирования: Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С. Прогноз и оценка ареала загрязнения почв в результате ветрового переноса частиц с подстилающей поверхности // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 2(69). С. 124–135. doi: 10.17072/2079-7877-2024-2-124-135

ECOLOGY AND NATURE USE

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-2-124-135

FORECAST AND ASSESSMENT OF THE AREA OF SOIL POLLUTION RESULTING FROM WIND TRANSPORT OF PARTICLES FROM THE UNDERLYING SURFACE

Zhanna Yu. Kochetova¹, Oleg V. Bazarskij², Ilya S. Lazarev³

^{1, 2, 3} Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

¹ zk_vva@mail.ru, Scopus ID: 6507543337, РИНЦ Author ID: 354688, SPIN-code: 5866-5956

² arhangel'skaya49@mail.ru, РИНЦ AuthorID: 140557, SPIN-code: 7490-4345

³ lazarev-ilya@list.ru, РИНЦ Author ID: 1108711, SPIN-code: 7511-5172

Abstract. Wind erosion of soils is the second factor in the spread of pollutants after water filtration. The existing mathematical models for estimating the spatial transport of polluted particles by atmospheric air are complex and are not used in practice due to the need to consider a large number of factors. This work adapts well-known mathematical and empirical models to describe the full cycle of wind erosion, including separation of particles from the soil column under the influence of wind at critical speeds; the rise of particles into the atmosphere to the height of their horizontal transport; sedimentation of particles from the air stream at different distances from the source; the likelihood of soil contamination with lead when particles of different radii fall out. The calculations carried out were experimentally confirmed when assessing pollution of the territories adjacent to the reconstructed state aviation airfield in Voronezh. During the reconstruction of the fuel and lubricants warehouse, with the extraction of underground 60-ton kerosene storage tanks, there was moved a huge amount of soil, which had been filtering dangerous pollutants for decades. According to calculations, the distance of contaminated particles transfer by ordinary wind (at a speed of up to 20 m/s) from an unorganized dust source can reach 6.5 km.



Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

The maximum contamination of soils with lead is possible at a distance of up to 500 m from the dust source in the direction of the prevailing wind. The model allows, in the first approximation, without complex mathematical calculations, to estimate the area of soil pollution due to the transfer of contaminated particles from an unorganized dust source of environmentally hazardous objects under the worst combination of climatic and geographical conditions.

Keywords: mathematical model, wind erosion, soil pollution, lead, airfield reconstruction

For citation: Kochetova, Zh.Yu., Bazarskiy, O.V., Lazarev, I.S. (2024). Forecast and assessment of the area of soil pollution resulting from wind transport of particles from the underlying surface. *Geographical Bulletin*. No.2(69). Pp. 124–135. doi: 10.17072/2079-7877-2024-2-124-135

Введение

Процесс переноса частиц атмосферным воздухом является предметом исследования фундаментальных наук и важен для решения практических задач [1]. В экологии особенно интересны механизмы подъема с подстилающей поверхности и переноса по воздуху радионуклидов и других загрязняющих веществ с почвенной пылью и связанные с этими процессами закономерности формирования их природных и антропогенных ареалов [2, 3]. Взаимосвязанные процессы отрыва, переноса и осаждения частиц почвы (грунта) из потока воздуха называют ветровой эрозией, которая определяется параметрами ветра, режимом атмосферных осадков, температурой воздуха, рельефом, шероховатостью поверхности, гранулометрическим и агрегатным составом грунта. Изучение ветровой эрозии осложняется значительно различающейся масштабностью составляющих ее процессов, в основе которых лежат различные механизмы [4].

Поступление, перенос, время пребывания загрязненных частиц в атмосфере и их особенности осаждения на подстилающую поверхность в значительной степени зависят от размеров и плотности самих частиц, а также характера перемещения воздушных потоков. Способы поступления частиц в среду обитания от организованных источников выбросов (заводских труб), когда промышленное предприятие рассматривается как точечный источник загрязнения, довольно хорошо описаны в литературе [5]. Химические элементы могут удерживаться на переносящих их твердых частицах в разнообразных формах (обменной, адсорбированной на поверхности оксидов и карбонатов, связанных с органическим веществом, и т.д.). Накопление загрязнителей в почвах во многом связано с тем, что существенное их количество поступает на подстилающую поверхность из атмосферы в форме труднорастворимых соединений [6].

Известно, что мелкие частицы являются основными транспортерами загрязняющих веществ с подстилающей поверхности [7, 8]. В атмосферном воздухе заметно преобладают твердые частицы размером 0,01–0,1 мм (около 60 % масс.); доля частиц размером менее 0,0025 мм составляет ~10 %; 0,1–1 мм – несколько меньше 10 %; 0,001 мм – не более 5 % от общей массы атмосферной взвеси [9]. В более плотной атмосфере с развитой турбулентностью частицы крупнее 0,06 мм ведут себя как аэрозольные. Независимо от происхождения, эти частицы имеют достаточно высокую скорость седиментации. Именно с ними в значительной мере связано формирование геохимических аномалий в депонирующих средах урбанизированных территорий, особенно в пределах и вблизи промышленных зон [10, 11].

Так, исследование аномально высокого загрязнения почв на прилегающих к аэродрому государственной авиации территориях во время его реконструкции поставило задачу прогнозирования переноса частиц от источников пыления (реконструируемых взлетно-посадочной полосы и склада горюче-смазочных материалов) [12]. Особенность проводимых строительных работ на аэродромах – перемещение и перемешивание с большой глубины огромного количества грунтов, которые подвергались на протяжении десятков лет интенсивному загрязнению нефтепродуктами, металлами и другими характерными загрязнителями для авиационной деятельности. Под неблагоприятное экологическое воздействие, вызванное реконструкцией аэродрома, попадают населенные пункты, рекреационные зоны, сельскохозяйственные угодья. Этот аспект необходимо учитывать на стадии планирования реконструкции аэродромов с целью выработки мер по снижению загрязнения прилегающих к ним территорий, а также по информированию граждан и пересмотру ведения хозяйственной деятельности на период интенсивного ветрового переноса загрязнителей и их трансформации в почвах.

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

До настоящего времени в РФ не проводились исследования влияния реконструкции аэродромов (и других строительных объектов) на загрязнение окружающей среды, не разработана методика для оценки пространственного загрязнения от реконструируемых экологически неблагоприятных объектов. Однако эта тема приобретает актуальность, так как сейчас уже проводятся и запланированы до 2030 г. масштабные работы по модернизации более 30 объектов авиационной деятельности Российской Федерации. Никаких предварительных мероприятий по прогнозу и снижению экологической опасности при этом не проводится. Это вызвано тем, что в литературе отсутствуют данные о влиянии на состояние окружающей среды реконструкции подобных объектов, связанной с перемещением огромного количества загрязненных грунтов. Иными словами, не было запроса на разработку прогнозных моделей ареала загрязнения приаэродромных территорий и подходов к снижению негативного воздействия пыления реконструируемых площадок на сравнительно большие территории.

Существуют методики расчета выбросов от неорганизованных источников промышленных объектов, в том числе карьеров и хвостохранилищ, которые служат для оценки и прогноза загрязнения пылью атмосферного воздуха рабочей зоны и не решают проблемы оценки пространственного загрязнения почв на прилегающих к объектам территориях [13]. Представленные в литературе немногочисленные модели по прогнозу отрыва и переноса загрязненных частиц почв требуют большого числа исходных данных, характеризуются сложностью вычислений и имеют больше научный, чем прикладной характер [14]. Кроме того, отсутствует модель, объединяющая процессы эрозии почвы и вероятность распределения содержания химических загрязнителей в почвах прилегающих территорий на разном удалении от источника пыления.

Целью работы является построение модели для прогноза ареала загрязнения почв свинцом в результате ветрового переноса частиц от неорганизованного источника пыления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: описать отрыв частиц от поверхности почв, их перенос потоком воздуха, осаждение на подстилающую поверхность; ранжировать зоны по вероятности загрязнения почв свинцом на прилегающих к источнику территориях с учетом розы ветров. Объединенная модель построена на основании известных теоретических и экспериментальных исследований.

Эта модель является оценочной, служит для грубого прогнозирования развития экологической ситуации при погодных условиях, способствующих пылению (наиболее жаркие и засушливые периоды с сильными ветрами) [1]. В модели не учитываются рельеф и шероховатость подстилающей поверхности, поэтому результаты расчета априори завышены, что не является проблемой при необходимости оценки максимально возможного ареала загрязнения в условиях реконструкции подобных строительных объектов. Верификацию модели проводили на примере ареала загрязнения почв свинцом при реконструкции типичного аэродрома государственной авиации в Центральном федеральном округе.

Методика исследования

Изначально проводился многолетний (с 2007 по 2019 г.) мониторинг почв на различном удалении от аэродрома государственной авиации «Балтимор» (г. Воронеж). Пробные площадки закладывали на удалении от контрольной точки аэродрома до ~9,2 км в населенных пунктах, дачном поселке и на территории сельскохозяйственных угодий в соответствии с розой ветров. Для определения условно-естественного геохимического фона проводили отбор проб почв в точке, расположенной в санатории им. Горького на расстоянии 13,6 км от аэродрома. Пробы почв отбирали 4 раза в год в сухую погоду и анализировали в сертифицированной лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области». Результаты исследования почв на приаэродромной территории показали значительное ухудшение экологической ситуации в период реконструкции аэродрома, что объясняется переносом загрязненных частиц почв ветром [12].

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

Для прогноза отрыва и подъема частиц почв под действием ветра на определенную высоту использовали модель Гендугова В.М. и Глазунова Г.П. [1], которая адаптирована для решения экологических задач и на сегодняшний день в несколько измененном виде применяется для исследования ветровой эрозии хвостохранилища Кара-Балтинского гидрометаллургического завода в республике Кыргызстан [15].

На первом этапе оценивали возможность отрыва частиц с радиусом r_i (мм) от поверхности почвы под действием ветра с критической скоростью $U_{кр}$ (м/с). Затем рассчитывали подъем «оторвавшихся» от почвы частиц в атмосферу на высоту H_i (м) и их горизонтальный перенос при скорости ветра U [1]. Скорость седиментации частиц U_{ci} на расстоянии от источника S_i (м) рассчитывали по известному закону Стокса [16]. На заключительном этапе оценивали вероятность химического загрязнения почв P_{ri} на различном удалении от источника пыления с учетом концентрации свинца в отдельных фракциях частиц с радиусами r_i и розы ветров.

Гранулометрический состав поверхностного слоя почвы определяли по стандартным методикам [17]. Для этого отбирали методом конверта со сторонами 30 м пять проб грунта, перемешенного в результате изъятия 60-тонной подземной цистерны и снятия старого дорожного покрытия на территории склада горюче-смазочных материалов (ГСМ) аэродрома. Для прогноза химического загрязнения почв, вызванного ветровым переносом частиц от реконструируемого аэродрома, определяли среднюю концентрацию свинца в пробах почв с территории склада, а также его средние концентрации в отдельных фракциях почвы. Свинец – тяжелый металл I класса опасности с ориентировочно допустимой концентрацией в песчаных и супесчаных почвах 32 мг/кг [18]. Наряду с керосином он является аналитом-маркером загрязнения депонирующих сред авиационной и космической деятельности [19].

В точках отбора проб на территории реконструируемого склада ГСМ почвы можно классифицировать, по Н.В. Качинскому, как супесчаные с содержанием физической глины 10–20 % [20]. Содержание свинца в пробах почв определяли в лаборатории комплексных исследований Воронежского государственного университета методом рентгеновской спектроскопии с применением РФА S8 TIGER (методика определения трейсовых содержаний элементов в почвах, горных породах фирмы Bruker, Германия).

Розу ветров строили по результатам наблюдений с 2012 по 2016 г., выполненных сотрудниками метеостанции, расположенной на территории исследуемого аэродрома государственной авиации. Относительную влажность воздуха, скорость и направление ветра измеряли 3 раза в сутки. В качестве примера в работе выбран месяц август, характеризующийся низкой среднемесячной относительной влажностью воздуха (54 %) и максимальной скоростью ветра – 20 м/с.

В модели рассматривается явление ветровой эрозии, вызванное обычным ветром (со скоростью до 15–20 м/с), то есть сравнительно однородным вихревым потоком, средняя скорость которого слабо зависит от высоты в основной его толще, но быстро убывает с высотой в приземной части (в пограничном слое) [1]. Из-за неустойчивого состояния воздуха в приземном слое, вызванного динамическими и термическими причинами, в нем непрерывно с определенной периодичностью зарождаются крупные вихри, которые, будучи неустойчивыми, распадаются и порождают более мелкие вихри. Мелкие вихри также распадаются с образованием еще более мелких и так далее, вплоть до вихрей молекулярного размера. Вместе с этим у земной поверхности, в области больших градиентов осредненных скоростей, даже над идеально гладкой искусственной поверхностью в изотермических условиях формируются вихри малых масштабов, которые, поднимаясь в поток, увеличиваются в размерах. Авторы модели [1] исходили из представления о том, что существует пороговая скорость ветра, называемая критической, при превышении которой начинается интенсивное выдувание почвы. Критическую скорость выдувания частиц из почвы можно рассчитать по уравнению:

$$U_{кр} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{r_i \rho_n g}{\rho_b}}, \quad (1)$$

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

где r_i – радиус почвенной частицы (м); g – ускорение силы тяжести ($9,8 \text{ м/с}^2$); $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотности почвенной частицы и воздуха (2660 и $1,16 \text{ кг/м}^3$); $2,4$ – эмпирический коэффициент, установленный по результатам наблюдений отрыва частиц от поверхности почв в аэродинамической трубе.

Результаты и обсуждение

Установлены средние для каждой градации радиусы частиц и их среднее массовое содержание в каждой градации. Результаты расчетов критических скоростей выдувания почвенных частиц с различными радиусами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критическая скорость выдувания частиц из почвы
Critical velocity of blowing particles from the soil

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	1,0	0,75	0,50	0,25	0,10	0,075	0,050	0,025	0,01
Критическая скорость выдувания $U_{\text{кр}}$, м/с	11,4	9,9	8,0	5,7	3,6	3,1	2,5	1,8	1,1

Таким образом, все почвенные частицы с представленными в табл. 1 радиусами могут подниматься над поверхностью при критической скорости ветра $\sim 11,4 \text{ м/с}$. Мелкие частицы способны отрываться от верхнего слоя почвы при скорости ветра $\sim 1\text{--}2 \text{ м/с}$. Эксперименты в аэродинамической трубе показали, что на критическую скорость выдувания частиц с поверхности почвы не влияет соотношение крупных и мелких фракций при содержании первых до 60 %. Но и тогда критическая скорость возрастает в ~ 2 раза, оставаясь при этом малой величиной. Гендугов В.М. и Глазунов Г.П. объясняют это образованием в порах почвы вихрей с вертикальной осью, которые выдувают более мелкие частицы из-под крупных. Помимо размера частиц, на критическую скорость влияние оказывают тип почв, влажность, комковатость, плотность почвенного покрова, наличие растительного покрова и других преград (шероховатость поверхности). Для прогноза худшего сценария экологического загрязнения почв в данной работе эти аспекты не учитывали.

После воздействия на частицы критической скорости ветра они начинают двигаться: совершают колебательные движения, перекатываются или скользят по поверхности, совершают скачки высотой от нескольких сантиметров до десятков и даже тысяч метров, перемещаются ветром в «подвешенном» состоянии. Траектория почвенных частиц авторами модели определяется эрозионным числом E_i [2], которое, по сути, является отношением подъемной силы Жуковского, действующей на частицу, к ее весу:

$$E_i = \frac{3 K_{**} U^2 \rho_{\text{в}}}{4 g r_i \rho_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $K_{**} = 0,12$ – коэффициент подъемной силы (установлено экспериментально); U – скорость потока воздуха (м/с).

При $E_i \gg 1$ вертикальная составляющая скорости движения частиц больше нуля, т.е. частицы движутся по восходящей и в конечном итоге могут безвозвратно покинуть траекторию, с которой «стартовали». Такие частицы преодолевают огромные расстояния прежде, чем выпасть из атмосферы. При $E_i = 1$ вертикальная составляющая скорости частицы равна нулю, то есть она движется параллельно поверхности. При $E_i < 1$ частица перекатывается по поверхности или движется скачками (сальтация). По сути, эрозионное число ограничивает применимость прогнозной модели ареала загрязнения почв для крупных и очень мелких частиц при определенных скоростях ветра.

Высоту скачка можно рассчитать по выражению [1, 15]:

$$H_i = \frac{4 k r_i^2 \rho_{\text{п}} U}{3 \eta \varphi}, \quad (3)$$

где k – отношение горизонтальной скорости потока частиц к критической скорости их подъема; U – скорость ветра, м/с; η – вязкость воздуха ($0,000018 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$); φ – коэффициент Стокса (для разнородных частиц $\varphi = 6$).

Скорость перемещения частиц в потоке воздуха U_n существенно ниже, чем скорость ветра U , и она растет с увеличением размера частиц. Так, при скорости ветра 3 м/с частицы с радиусом

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

0,005 мм перемещаются в потоке со скоростью 0,43 м/с, а с радиусом 0,5 мм – 2,6 м/с [21]. На основании ранее полученных Базарским О.В. результатов введем коэффициенты замедления скорости переноса частиц ветром K_{zi} , которые показывают, во сколько раз скорость движения частицы в потоке воздуха меньше скорости ветра (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты замедления горизонтального переноса частиц ветром
Deceleration coefficients of horizontal particle transport by wind

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	1,0	0,75	0,50	0,25	0,10	0,075	0,050	0,025	0,01
Коэффициент замедления частиц K_{zi}	1,0	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,8	3,8

Тогда, с учетом поправочного коэффициента, высота скачка частиц определяется следующим соотношением:

$$H_i = \frac{4r_i^2 \rho_{\text{п}} U^2}{3\eta\phi K_{zi} U_{\text{кр}}} \quad (4)$$

Результаты расчета высоты скачка H (м) частиц с радиусами r_i представлены в табл. 3.

Таблица 3

Высота скачка частиц H (м) в зависимости от скорости ветра
The height of the particle jump H (m) depending on the wind speed

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с					
	2	5	7	10	15	20
1,0	↓	↓	↓	↓	636	1132
0,75	↓	↓	↓	186	418	744
0,50	↓	↓	↓	89,2	200	356
0,25	↓	↓	12,3	25,0	56,3	100
0,10	↓	1,25	2,45	5,00	11,3	20,0
0,075	↓	0,75	1,47	3,00	6,75	12,0
0,050	↓	0,35	0,69	1,40	3,15	5,60
0,025	0,016	0,10	0,20	0,40	0,90	1,60
0,010	0,0032	0,020	0,039	0,080	0,18	0,32

↓ – неподвижные частицы ($U < U_{\text{кр}}$)

Скорость седиментации U_{ci} частиц различной формы с известными радиусами из потока воздуха описывается законом Стокса [16]. Закон справедлив, если частицы дисперсной фазы осаждаются независимо друг от друга, что может быть только в разбавленных системах. Континуумы частиц с различными радиусами, «стартовыми» со своими скоростями, движутся по своим траекториям, не оказывая влияния друг на друга, то есть континуумы являются взаимопроницаемыми. Уравнение Стокса для расчета скорости седиментации частиц имеет вид (табл. 4):

$$U_{ci} = \frac{2g\rho_{\text{п}}r_i^2}{9\eta\phi} \quad (5)$$

Таблица 4

Скорость седиментации частиц с различными радиусами
Sedimentation rate of particles with different radii

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	1,0	0,75	0,50	0,25	0,10	0,075	0,050	0,025	0,01
Скорость седиментации частиц, м/с	53,6	30,2	13,4	3,35	0,54	0,30	0,13	0,033	0,005

Зная высоту подъема частиц с различными радиусами, можно рассчитать время их осадения из потока воздуха (табл. 5):

$$\tau_i = H_i / U_{ci} \quad (6)$$

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

Таблица 5

Время осаждения частицы из потока воздуха τ_i (с)
Time of particle deposition from the air stream τ_i (s)

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с					
	2	5	7	10	15	20
1,0	↓	↓	↓	↓	11,9	21,1
0,75	↓	↓	↓	6,16	13,8	24,6
0,50	↓	↓	↓	6,66	14,9	26,6
0,25	↓	↓	3,67	7,46	16,8	29,8
0,10	↓	2,32	4,53	9,26	20,9	37,0
0,075	↓	2,50	4,90	10,0	22,5	40,0
0,050	↓	2,69	5,31	10,8	24,2	43,1
0,025	0,49	3,03	6,06	12,1	27,3	48,5
0,010	0,64	4,00	7,80	16,0	36,0	64,0

Путь переноса частиц ветром от центральной точки источника пыления (реконструируемого склада ГСМ) до места осаждения (табл. 6):

$$S_i = \tau_i \cdot U \cdot K_{zi}. \quad (7)$$

Таким образом, крупные частицы поднимаются вихрями на сотни метров, но осаждаются быстрее, загрязняя территорию в радиусе ~0,5 км. Мелкие частицы поднимаются над поверхностью и практически сразу увлекаются ветром, ареал их распространения при сильных ветрах достигает нескольких км, что согласуется с известными данными [1, 4, 11, 12, 15, 19].

Таблица 6

Расстояние от источника загрязнения до места осаждения частицы S_i (м)
Distance from the pollution source to the particle deposition site S_i (m)

Радиусы почвенных частиц r_i , мм	Скорость ветра U , м/с					
	2	5	7	10	15	20
1,0	↓	↓	↓	↓	179	422
0,75	↓	↓	↓	61,6	207	492
0,50	↓	↓	↓	80,0	268	638
0,25	↓	↓	36,0	104	353	834
0,10	↓	19,7	53,9	157	533	1258
0,075	↓	23,8	65,2	190	641	1520
0,050	↓	28,2	78,1	227	762	1810
0,025	2,74	42,4	119	339	1147	2716
0,010	4,86	76,0	207	608	2052	4864

Роза ветров позволяет по длине лучей построенной лепестковой диаграммы выявить направление преобладающего ветра, со стороны которого чаще всего приходит воздушный поток в данную местность. Результаты измерений представлены в табл. 7. Наиболее распространенные скорости ветра не превышают 5 м/с, при этом преобладающими направлениями являются северо-запад и северо-восток. Ветер, достигающий скорости 20 м/с, зафиксирован 2–3 раза в месяц и только с юго-восточного и южного направлений.

Таблица 7

Скорости и вероятности направления ветра в июне
Wind speeds and wind direction probabilities in June

Скорость ветра, м/с	Вероятность направления ветра P_{U_i}											
	С	30	60	В	120	150	Ю	210	240	З	300	330
0-2	0,022	0,059	0,053	0,034	0,035	0,041	0,025	0,028	0,032	0,023	0,027	0,024
3-5	0,029	0,025	0,024	0,022	0,038	0,048	0,020	0,018	0,034	0,065	0,064	0,082
6-7	0,006	-	0,001	-	0,011	0,011	0,001	0,001	0,006	0,026	0,023	0,011
8-10	0,002	-	-	-	0,004	0,007	0,001	-	0,002	0,006	0,004	0,002
11-15	-	-	-	-	0,001	0,002	0,001	-	-	-	-	-
>15	-	-	-	-	-	0,001	0,001	-	-	-	-	-

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

Средняя концентрация свинца в поверхностном слое почвы на территории реконструируемого склада ГСМ составила $C_{Pb} = 124,8$ мг/кг, что соответствует четырехкратному превышению его установленной ориентировочно допустимой концентрации. Содержание свинца (P^{Pb}_{ri}) в почве растет с уменьшением радиуса частиц, что подтверждается ранее полученными данными [7, 8]. Вероятность загрязнения почвы по размерам частиц возможно рассчитать как произведение вероятностей двух независимых событий:

$$P_{3i} = P_{ri} \cdot P^{Pb}_{ri}. \quad (8)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 8. Наибольшую опасность представляют частицы с $r_i = 0,010$ мм, образующие многочисленную градацию исследуемой почвы с наиболее высоким содержанием свинца. При сильном ветре ($U > 15$ м/с) они могут преодолевать расстояния более 2 км от источника.

Таблица 8

Концентрационное распределение свинца в пробах грунта
с различными радиусами частиц
Concentration distribution of lead in soil samples with different particle radii

Радиус частиц r_i , мм	Вероятность распределения частиц грунта по размерам P_{ri}	Вероятность распределения содержания свинца по размерам частиц P^{Pb}_{ri}	Вероятность загрязнения фракции почвы свинцом $P_{3i} \cdot 10^{-3}$
1,0	0,005	0,02	0,10
0,75	0,006	0,05	0,30
0,50	0,012	0,05	0,60
0,25	0,032	0,09	2,9
0,10	0,095	0,09	8,6
0,075	0,14	0,12	16,8
0,050	0,17	0,14	23,8
0,025	0,22	0,19	41,8
0,010	0,32	0,25	80,0
Σ	1	1	

Вероятность загрязнения территории от геометрического центра реконструируемого склада ГСМ (P_S) с шагом 0,5 и далее 2 км рассчитывали как сумму произведений вероятности независимых несовместных событий – загрязнения i -той фракции частиц свинцом и вероятности скорости ветра по каждому из направлений розы ветров P_{Ui} (табл. 9):

$$P_S = \sum P_{3i} P_{Ui}. \quad (9)$$

Например, на расстоянии 500–2500 м от источника (табл. 6, выделенные значения) в направлении ветра 150 при возможных скоростях ветра 10–15 м/с (табл. 7) оседают частицы $r = 0,010$ мм (при $U = 10$ и 15 м/с); $r = 0,025$ мм (при $U = 15$ м/с); $r = 0,050, 0,075$ и 0,10 мм (при $U = 15$ и 20 м/с); $r = 0,25$ и 0,50 мм (при $U = 20$ м/с). При меньших скоростях ветра частицы оседают на поверхность на расстоянии до 500 м от центра, поэтому в этом примере они не учитываются. Вероятность загрязнения свинцом частиц с перечисленными радиусами $P_{3i} \cdot 10^{-3}$ представлена в табл. 8. С учетом распределения скорости ветра (0,007, 0,002 и 0,001) по румбу 150 вероятность загрязнения почв металлами по формуле (9) будет составлять: $P_S = 80,0 \cdot 10^{-3}(0,007+0,002)+41,8 \cdot 10^{-3}(0,002)+23,8 \cdot 10^{-3}(0,002+0,001)+16,8 \cdot 10^{-3}(0,002+0,001)+8,6 \cdot 10^{-3}(0,002+0,001)+2,9 \cdot 10^{-3}(0,001)+0,60 \cdot 10^{-3}(0,001)=0,95 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 9

Вероятность загрязнения почв свинцом по направлениям ветра от источника пыления
Probability of soil contamination with lead at different wind directions from the dust source

Расстояние S , м	Вероятность загрязнения почвы свинцом $P_S \cdot 10^{-3}$											
	С	30	60	В	120	150	Ю	210	240	З	300	330
<500	9,2	11,5	10,7	7,9	13,1	15,8	6,7	6,7	10,9	19,0	18,6	20,0
500-2500	0,16	-	-	-	0,49	0,95	0,31	-	0,16	0,48	0,32	0,16
2500-4500	-	-	-	-	-	0,04	0,04	-	-	-	-	-
>4500	-	-	-	-	-	0,08	0,08	-	-	-	-	-

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

Самое высокое загрязнение почв возможно вблизи источника пыления, так как для наиболее вероятных скоростей ветра на аэродроме (0–5 м/с) большинство частиц различных размеров совершают небольшие скачки и оседают на почву. Теоретически число таких скачков при тех же скоростях ветра над идеальной поверхностью может быть бесконечным, что практически невозможно учесть при моделировании ветрового переноса частиц из-за шероховатости поверхности. Максимальное значение $P_S = 20,0 \cdot 10^{-3}$ получено на расстоянии до 500 м от геометрического центра реконструируемого склада ГСМ (румб 330).

Для удобства интерпретации результатов строили лепестковые диаграммы загрязнения почв на различном удалении от источника пыления. В каждом секторе диаграммы цветом указаны нормированные относительно максимального значения вероятности загрязнения почв:

[1–0,75) – зона чрезвычайно высокой вероятности загрязнения почв свинцом – черный цвет на диаграмме;

[0,75–0,50) – зона опасной вероятности – красный;

[0,5–0,1) – зона высокой вероятности – оранжевый;

[0,1–0,010) – зона средней вероятности – желтый;

$\leq 0,010$ – зона низкой вероятности – серый.

Расположение секторов диаграммы совпадает с направлением лучей розы ветров (рис.). При наложении диаграммы на карту исследуемой приаэродромной территории можно прогнозировать экологическую ситуацию в отдельных точках.

Надо отметить, что в статье представлены результаты расчетов только для одного месяца, а реконструкция аэродрома и склада ГСМ длилась несколько лет. Поэтому значения вероятности загрязнения почв приаэродромной территории свинцом за весь период реконструкции будут гораздо выше, чем расчетные за один месяц. Это подтверждают результаты проведенного ранее анализа почв на приаэродромной территории в пяти контрольных точках [12, 22]. Самая высокая концентрация свинца зафиксирована на территории аэродрома в радиусе 500 м от склада ГСМ, она составляла 1,7–2,0 ОДК, что соответствует 11,3 фоновым концентрациям. Опасное загрязнение почв свинцом, превышающее фон в 7–9 раз, определено на расстоянии 1,8 и 2,2 км от склада ГСМ (направление ветра 120), что соответствует расчетам (желтый цвет на диаграмме). На расстоянии

3,1 и 3,5 км (румбы 270 и 300) концентрация свинца не превышала нормативов. Максимально возможное распространение загрязненных свинцом частиц возможно на расстоянии до 6,5 км к югу от склада по направлению ветра со скоростью 15–20 м/с. Здесь прогнозируемое загрязнение почв меньше, чем вблизи от аэродрома, что объясняется низкой повторяемостью ветров с большими скоростями, способными переносить частицы на такие расстояния (серый цвет на диаграмме). Концентрации свинца в анализируемых почвах, отобранных на расстоянии 9,2 км от склада ГСМ, на протяжении всего периода реконструкции аэродрома соответствовали норме (не превышали ОДК). Таким образом, построенная модель имеет хорошую сходимость с полученными экспериментальными данными и может быть использована для выявления загрязненных территориях на прилегающих к реконструируемому объектам территориях.



Рис. Диаграмма прогнозируемого ареала загрязнения почв свинцом и карта с контрольными точками

Fig. Diagram of the predicted area of soil contamination with lead and a map with control points

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

Выводы

Построена модель для прогноза ареала загрязнения почв свинцом в результате ветрового переноса частиц от неорганизованного источника пыления. При этом были решены следующие задачи:

1) Описаны процессы отрыва частиц от поверхности почв, переноса их потоком воздуха и осаждения на подстилающую поверхность. Установлено, что все почвенные частицы с радиусами от 0,01 до 1,0 мм поднимаются над поверхностью при критической скорости ветра ~11,4 м/с; мелкие частицы способны отрываться от верхнего слоя почвы при скорости ветра 1–2 м/с. Высота скачка тем больше, чем тяжелее частица, и при сильных ветрах (≥ 20 м/с) может достигать 1000 м. Тяжелые частицы практически сразу оседают на подстилающую поверхность вблизи источника пыления. Частицы с радиусами 0,01–0,5 мм переносятся ветром на сотни метров, максимальная длина скачка у легких частиц, согласно расчетам, может достигать 4,9 км.

2) Ранжированы зоны по вероятности загрязнения почв свинцом на прилегающих к источнику пыления территориях с учетом розы ветров. Принимая во внимание распределения загрязнения отдельных фракций почвы свинцом в источнике пыления и параметров переноса этих фракций почв ветром, рассчитана вероятность загрязнения почв свинцом на различном удалении от источника пыления. Установлено, что с уменьшением размера частиц почв их загрязнение свинцом растет. С учетом повторяемости скорости и направления ветра выделены вероятные зоны ареала загрязнения почв свинцом. Чрезвычайно высокая, опасная и высокая вероятности загрязнения почв свинцом расположены в радиусе 500 м от источника пыления. Зона средней вероятности загрязнения почв свинцом достигает 2,5 км. Зона низкой вероятности по направлению сильных ветров распространяется на 4,5 км от источника пыления. С более мелкой пылью, которую в модели не учитывали из-за граничных условий, и при возникновении более сильных ветров эта зона может простираться на большие расстояния.

Сопоставление полученных расчетных результатов ареала загрязнения почв анализом-маркером депонирующих сред аэродромной и космической деятельности с экспериментальными результатами исследований на территории, прилегающей к реконструируемому аэродрому, показало хорошую сходимость.

Предложенная модель отличается от существующих полнотой описываемых процессов ветровой эрозии почв и вызванного ею загрязнения почв на прилегающих к источнику территориях. Для прогнозирования ареала загрязнения необходимо минимальное число данных, всегда доступных для экологических служб (фракционный состав частиц, их загрязнение приоритетными загрязнителями или загрязнителями-маркерами, средние за период реконструкции скорость и направление ветра). Для более точной оценки необходимо исследовать ветровой перенос частиц с учетом шероховатости поверхности, осадков.

Результаты исследования могут быть использованы для оценки загрязнения приаэродромных территорий при масштабных реконструкциях аэродромов, а также других экологически неблагоприятных объектов с источниками неорганизованного пыления.

Список источников

1. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 240 с.
2. Хадарцев А.А., Панарин В.П., Кашинцева Л.В., Седова О.А. Оценка воздействия горного предприятия на прилегающую территорию по фактору инертной пыли // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2019. Вып. 4. С. 80–91.
3. Май И.В., Макс А.А., Загороднов С.Ю., Чигвинцев В.М. Методические подходы к учету скорости оседания различных пылевых фракций для задач оценки экспозиции населения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 5 (3). С. 792–795.
4. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв: учебник. М.: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС», 2004. 352 с.
5. Израэль Ю.А. Экология. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 560 с.
6. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 3. С. 14–22.
7. Тигеев А.А., Аксенов Н.В., Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю. Оценка пылевого загрязнения атмосферы наземными и дистанционными методами (на примере г. Тобольск) // Географический вестник. 2021. № 2(57). С. 121–134.

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

8. Янин Е.П. Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). М.: ИМГРЭ, 2003. 82 с.
9. Петрянов-Соколов И.В., Сутургин А.Г. Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 144 с.
10. Касимов Н.Е., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–24.
11. Алексеенко В.А. Формирование современного геохимического облика почв и использование отходов промышленного производства // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2015. Т. 11, № 1. С. 4–19.
12. Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Терентьев В.В. Интегральная оценка загрязнения почв при реконструкции аэродрома // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 448–462.
13. Малиновская Е.А., Каплан Л.Г. Модель отрыва частиц поверхности // Маркшейдерия и недропользование. 2007. № 3. С. 55–61.
14. Равшанов Н.К., Каршиев Д.А., Юлдашев Б.Э. Моделирование процесса переноса и диффузии мелкодисперсных частиц в атмосфере с учетом эрозии почвы // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 4. С. 140–152.
15. Васильев И.А., Овчинников Н.А., Чернов В.В., Шестаков А.А. Геомиграционная модель переноса урана. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 34 с.
16. Ветoshкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы). Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 325 с.
17. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
18. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. 635 с.
19. Кочетова Ж.Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 79–91.
20. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
21. Базарский О.В., Косинова И.И., Фонова С.И. Математическое моделирование загрязнения приповерхностных отложений аэрозольными частицами // Инженерные изыскания. 2015. № 5–6. С. 76–79.
22. Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Базарский О.В. Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда. М.: Инфра-М, 2022. 266 с.

References

1. Gendugov V.M., Glazunov G.P. (2007) *Vetrovaya eroziya pochvy i zapylenie vozduha* [Wind erosion of soil and air dusting], PHIZMATLIT, Moscow, Russia.
2. Hadarcev A.A., Panarin V.P., Kashinceva L.V., Sedova O.A. (2019) Assessment of the impact of a mining enterprise on the adjacent territory by the factor of inert dust, *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, no. 4, pp. 80–91.
3. Maj I.V., Maks A.A., Zagorodnov S.Yu., Chigvincev V.M. (2012) Methodological approaches to accounting for the settling rate of various dust fractions for the tasks of assessing the exposure of the population, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, vol. 14, no. 5 (3), pp. 792–795.
4. Kuznecov M.S., Glazunov G.P. (2004) *Eroziya i ohrana pochv: uchebnik* [Erosion and soil protection: textbook], Izd-vo «Koloss», Izd-vo MGU, Moscow, Russia.
5. Izrael' Yu.A. (1984) *Ekologiya* [Ecology], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
6. Kasimov N.S., Vlasov D.V. (2018) Heavy metals and metalloids in the soils of Russian cities (according to the annual reports of Roshydromet), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, no. 3, pp. 14–22.
7. Tigeev A.A., Aksenov N.V., Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu. (2021) Assessment of dust pollution of the atmosphere by ground and remote methods (on the example of Tobolsk), *Geograficheskij vestnik*, no. 2 (57), pp. 121–134.
8. Yanin E.P. (2003) *Promyshlennaya pyl' v gorodskoj srede (geohimicheskie osobennosti i ekologicheskaya ocenka)* [Industrial dust in the urban environment (geochemical features and environmental assessment)], IMGRE, Moscow, Russia.
9. Petryanov-Sokolov I.V., Suturgin A.G. (1989) *Aerozoli* [Aerosols], Nauka, Moscow, Russia.
10. Kasimov N.E., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. (2012) Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, no. 4, pp. 14–24.
11. Alekseenko V.A. (2015) Formation of the modern geochemical appearance of soils and the use of industrial waste, *Ekologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza*, vol. 11, no. 1, pp. 4–19.
12. Lazarev I.S., Kochetova Zh.Yu., Maslova N.V., Terent'ev V.V. (2022) Integral assessment of soil pollution during airfield reconstruction, *Regional'nye geosistemy*, vol. 46, no. 3, pp. 448–462.
13. Malinovskaya E.A., Kaplan L.G. (2007) Model of separation of surface particles, *Markshejderiya i nedropol'zovanie*, no. 3, pp. 55–61.
14. Ravshanov N.K., Karshiev D.A., Yuldashev B.E. (2018) Modeling of the process of transfer and diffusion of fine particles in the atmosphere taking into account soil erosion, *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, no. 4, pp. 140–152.
15. Vasil'ev I.A., Ovchinnikov N.A., Chernov V.V., Shestakov A.A. (2007) *Geomigracionnaya model' perenosy urana* [Geomigration model of uranium transfer], RFYAc-VNIITF, Snezhinsk, Russia.
16. Vetoshkin A.G. (2004) *Processy inzhenernoj zashchity okruzhayushchej sredy (teoreticheskie osnovy)* [Processes of engineering environmental protection (theoretical foundations)], Izd-vo Penz. gos. un-ta, Penza, Russia.
17. GOST 12536-2014. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava* [GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition], Standartinform, Moscow, Russia.
18. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans], Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 28.01.2021 no. 2, Moscow, Russia.

Экология и природопользование
Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Лазарев И.С.

19. Kochetova Zh.Yu. (2019) Aviation-rocket cluster as a new class of objects of geoeological monitoring, *Geograficheskij vestnik*, no. 3 (50), pp. 79–91.
20. Vadyunina A.F., Korchagina, Z.A. (1986) *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods of investigation of physical properties of soils], Agropromizdat, Moscow, Russia.
21. Bazarskij O.V., Kosinova I.I., Fonova S.I. (2015) Mathematical modeling of pollution of near-surface sediments by aerosol particles, *Inzhenernye izyskaniya*, no. 5–6, pp. 76–79.
22. Kochetova Zh.Yu., Maslova N.V., Bazarskij O.V. (2022) *Aviacionno-raketnye klasteri i okruzhayushchaya sreda* [Aviation-missile clusters and the environment], Infra-M, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию: 05.06.23, одобрена после рецензирования: 03.04.24, принята к опубликованию: 13.05.24.
 The article was submitted: 5 June 2023; approved after review: 3 April 2024; accepted for publication: 13 May 2024.

Информация об авторах

Жанна Юрьевна Кочетова

Доктор географических наук, доцент кафедры радиотехнических систем (и средств обеспечения полетов) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

e-mail: zk_vva@mail.ru

Олег Владимирович Базарский

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и химии Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

e-mail: zk_vva@mail.ru

Илья Сергеевич Лазарев

Помощник начальника отдела Центра организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»; 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А

e-mail: lazarev-ilya@list.ru

Information about the authors

Zhanna Yu. Kochetova

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Engineering Systems (and Flight Support Facilities), Zhukovskiy – Gagarin Air Force Academy;

54A, Starykh Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

Oleg V. Bazarskij

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics and Chemistry, Zhukovskiy – Gagarin Air Force Academy;

54A, Starykh Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

Ilya S. Lazarev

Assistant to the Head of the Department of the Center for Organization of Scientific Work and Training of Academic and Teaching Personnel, Zhukovskiy – Gagarin Air Force Academy;

54A, Starykh Bolshevikov st., Voronezh, 394064, Russia

Вклад авторов

Кочетова Ж.Ю. – идея, написание статьи, научное редактирование текста.

Базарский О.В. – научное консультирование, редактирование текста.

Лазарев И.С. – сбор и обработка материала, проведение расчетов, оформление графического материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Zhanna Yu. Kochetova – the idea; writing of the article, scientific editing of the text.

Oleg V. Bazarskij – scientific consulting; editing of the text.

Ilya S. Lazarev – material collection and processing; calculations; graphic material design.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.