

## КЕРОСИНОВОЕ ТОПЛИВО КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ (ОБЗОР)

©2024 г. Т. В. Королева<sup>а</sup>, И. Н. Семенков<sup>а, \*</sup>, С. А. Леднев<sup>а</sup>, О. С. Солдатова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>АО «ЦЭНКИ»-КЦ «Южный», ул. Школьная, 1, Байконур, 468320 Казахстан

\*e-mail: [semenkov@geogr.msu.ru](mailto:semenkov@geogr.msu.ru)

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 01.05.2024 г.

Керосин широко используется в различных видах антропогенной деятельности. Вопрос его экологической безопасности наиболее часто поднимается в связи с использованием реактивного топлива самолетами и ракетами-носителями. На всех этапах жизненного цикла авиация и ракетно-космическая техника воздействуют на окружающую среду. В авиации загрязнение атмосферного воздуха и наземных экосистем обусловлено в первую очередь керосином и продуктами его неполного сгорания и технологически предусмотрено при сливе топлива в воздухе в случае аварийной посадки у ряда моделей. При эксплуатации ракетно-космической техники керосин поступает в наземные экосистемы в результате проливов топлива из двигателей и баков горючего на местах падения отработавших первых ступеней ракет-носителей. Из вторых и третьих ступеней ракет-носителей керосин не поступает в наземные экосистемы. Компонентный состав аэрозольных эмиссий из двигателей самолетов и ракет-носителей изучен достаточно детально. При этом в отношении почв практически отсутствуют публикации с репрезентативными выборками и их статистической обработкой не только по содержанию керосина, но и суммарному содержанию нефтепродуктов в почвах зон воздействия авиационно-космической техники. Тем не менее, имеющиеся данные и результаты математического моделирования позволяют утверждать, что при штатном режиме эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники наблюдается приемлемый уровень поступления углеводородов в наземные экосистемы, не превышающий ассимиляционный потенциал. То есть поступающее количество керосина достаточно быстро исчезает, не нанося необратимого урона.

*Ключевые слова:* авиационное топливо, дерново-подзолистые почвы (Albic Retisols), бурые аридные почвы (Calcisols), ракетно-космическая деятельность, суммарное содержание нефтяных углеводородов, летучие органические соединения

**DOI:** 10.31857/S0032180X24090095, **EDN:** WLOWIK

### ВВЕДЕНИЕ

Керосин – нефтяная фракция, выкипающая в интервале температур около 140–280°C, которую получают при перегонке или вторичной переработке нефти и состоящая преимущественно из длинномерных алканов (C<sub>8</sub>–C<sub>14</sub>) [52, 53]. В России ежегодно для внутренних нужд производится около 11 млн. т. керосина [33]. Наиболее универсальный из всех видов керосина – технический керосин (ГОСТ 18499-73) – применяют в химической промышленности, как топливо при обжиге стеклянных и фарфоровых изделий и растворитель для промывки механизмов и деталей, в

качестве растворителя при производстве асфальта [56]. Осветительный керосин (ГОСТ 11128-65, ГОСТ 4753-68) используют для освещения в 500 тыс. домохозяйств [44], как топливо в разнообразных плитках и в отоплении.

Керосиновые топлива используют в авиационно-космической технике и отличаются содержанием S, органических веществ, в состав которых входят S, N и O [9], смолистых соединений, нестабильных углеводородов, наличием присадок, улучшающих эксплуатационные характеристики, снижающих электропроводность и ингибирующих коррозию и жизнедеятельность биоты [51].

Современные гражданские и военные самолеты и вертолеты с газотурбинными двигателями работают на авиационном керосине (реактивное топливо). В России для дозвуковой авиации ГОСТ 10227-2013 предусматривает использование марок керосина ТС-1, Т-1, Т-1С, Т-2 и РТ, а для сверхзвуковой – Т-6 и Т-8В по ГОСТ 12308-2013. Наиболее массовыми являются взаимозаменяемые ТС-1 и РТ. В ракетах-носителях используют керосин марок Т-1 и РГ-1 в паре с жидким кислородом [29]. Ракетный и авиационный керосин состоят преимущественно из (цикло)алканов и в меньшей степени – алкенов и ароматических углеводородов [29, 48, 49].

Химическое воздействие авиационно-космической техники на окружающую среду обусловлено в первую очередь эмиссией двигателями отработавших газов от поверхности земли до околоземного космического пространства [14, 18, 42, 43, 55, 57]. Основные выбросы авиационных и ракетных двигателей при полном сжигании керосина – это  $\text{CO}_2$  (около 72 и 71% соответственно) и вода (около 28 и 29%) [29, 31, 47]. Окисление атмосферного  $\text{N}_2$  при очень высоких температурах в камерах сгорания двигателей приводит к образованию  $\text{N}_x\text{O}_y$ . На побочные продукты неполного сгорания приходится <1% выхлопных газов [29, 51], в составе которых могут присутствовать продукты сгорания, трансформации смазочных масел [34, 35, 41, 65] и износа механических деталей [36]. В авиационных двигателях  $\text{SO}_x$ , дополнительные  $\text{N}_x\text{O}_y$ , несгоревшие углеводороды и твердая сажа [5] возникают за счет примесей [34, 51] и неидеальных условий сгорания – уменьшения мощности тяги.

Цель работы – оценка загрязнения почв реактивным топливом при штатном использовании авиационной и ракетно-космической техники и асимбиотического потенциала наземных экосистем по отношению к керосину.

## АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ КЕРОСИНОМ

Штатная эксплуатация двигателей в гражданской авиации влечет за собой загрязнение окружающей среды продуктами сгорания топлива и не предполагает эмиссию керосина. В соответствии с Авиационными правилами (АП-23. “Нормы летной годности гражданских легких самолетов”), обычно реактивный лайнер набирает высоту в 1 км примерно за минуту. За счет диффузии в атмосфере загрязняющие вещества, выбрасываемые на высоте выше 900 м, не достигают земной поверхности и практически не загрязняют приземный слой воздуха [20]. Примерно 90% выбросов самолетов, за исключением углеводородов и СО (около 70%), образуется по трассе полета. Остальная часть выбрасывается при посадке, взлете и рулении на земле,

что определяет минимальный риск загрязнения почв [12, 14, 19, 37].

Согласно Приложению 16 к Конвенции о международной гражданской авиации, конструкция воздушных судов предотвращает преднамеренный выброс в атмосферу жидкого топлива из соплового коллектора при остановке двигателя по завершении нормального полета или операций на земле. Современные ближнемагистральные и региональные модели самолетов в случае предстоящей вынужденной или аварийной посадки также не способны сливать топливо и во время полета. Такая возможность есть только у широкофюзеляжных дальнемагистральных самолетов и ряда военных моделей за счет специальных приспособлений, через которые керосин принудительно выдавливается из топливных баков и рассеивается в окружающую атмосферу [2]. Информация о сливе топлива в воздухе военной авиацией весьма противоречива (табл. S1).

Математические модели [2–4, 5, 23] аварийного сброса топлива самолетом показывают наличие предельной высоты, зависящей от конкретных метеоусловий (в основном, распределение температур), ниже которой сброс топлива приводит к выпадению неиспарившегося керосина на почву. Чем ниже температура воздуха, тем больше должна быть высота сброса топлива для минимизации экологических последствий. Например, для юга Кыргызстана, острова Сахалин и Западной Сибири в теплый период года она составляет 5–6 км. Для наиболее жаркого месяца (июля) Западной Сибири она уменьшается до 1 км, а с ноября по март при сбросе с любой высоты полета весь керосин не успевает испариться, и в январе–феврале по расчетам около половины сброшенного топлива попадает на поверхность земли [3]. Но в литературе отсутствуют фактические данные, подтверждающие такое выпадение керосина из атмосферы.

Особо стоит отметить, что все существующие математические модели аэрогенного загрязнения почв керосином в результате сброса самолетами, совсем не учитывают его биогенное и абиогенное разрушение и испарение. При этом вклад данных процессов в снижение концентрации керосина очень высок [17, 39, 43, 58, 59]. Так, сухие песчаные почвы, в которых специально не подавляли активность биоты, через 5 мес. после внесения керосина потеряли 85% углеводородов, а с пониженной активностью – только 25% [40]. Рассчитываемое по математическим моделям количество керосина, поступающего на поверхность земли, из минеральных почв быстро испарится, будет разрушено биотой или под действием физических факторов среды. Материал пахотного горизонта песчаной и суглинистой почвы и торф из исторической провинции Уппланд Швеции, насыщенный керосином до состояния предельной керосиномкости и

помещенный в чашки Петри, за 2 дня при температуре 27°C потерял за счет испарения 97, 70 и 43% углеводов [39]. По другим данным, в торфяных почвах аварийное загрязнение легколетучими углеводородами может сохраняться длительное время [11].

В работах [7, 32] утверждается, что в военной авиации керосин и другие поллютанты поступают в атмосферу при использовании форсажного режима — увеличения тяги во время взлета, разгона до сверхзвуковой скорости или воздушных маневров за счет сжигания дополнительного топлива в форсажной камере и повышения интенсивности теплового процесса. При этом образуются и могут рассеиваться капли из керосина [7, 18], которые впоследствии осаждаются на землю [2, 7, 32]. Математическая модель выпадения 1 кг керосина на поверхность почвы с высоты 100 м при разбросе на 1–2313 м капель различного диаметра обособывает загрязнение территорий вокруг аэродромов на расстоянии 100–1500 м от взлетно-посадочной полосы [7]. По этой модели за 50 лет эксплуатации аэродрома в непосредственной близости от его взлетно-посадочной полосы максимальный уровень загрязнения почв керосином составит 58 г/кг. Однако стоит подчеркнуть, что данная модель [7] также не учитывает потери от испарения и биологической трансформации углеводов. Если учесть естественное самоочищение почв от углеводов, то рассчитанный уровень загрязнения снизится до значений, не обнаруживаемых хромато-масс-спектрометрическим методом, за несколько лет даже при условии единоразового поступления всего объема поллютантов [26, 58, 59].

Можно предполагать наличие в почвах зоны взлета и посадки самолетов не керосина, а продуктов его неполного сгорания, возникающих при обычном режиме эксплуатации и при использовании форсажа. Поскольку реактивное топливо в основном состоит из длинномерных алканов ( $C_8-C_{14}$ ), то обнаруживаемые в выхлопных газах самолетов более легкие углеводороды и альдегиды ( $C_2-C_7$ ) являются продуктами его неполного сгорания, а не исходным горючим [52, 53]. Даже если допустить осаждение капель керосина при использовании форсажного режима, то вероятнее всего количество выпавшего из атмосферы загрязнителя столь мало, что поступившие и неиспарившиеся остатки успешно метаболизируются почвенными организмами [10, 27, 59] или разрушатся под действием абиотических процессов [30, 62]. В российской и зарубежной литературе не удалось найти работ, которые бы показывали существенное загрязнение почв углеводородами вблизи аэродромов и гражданских аэропортов.

Еще одной проблемой, время от времени обсуждаемой в прессе, является наличие на военных аэродромах подземных “керосиновых линз”

объемом тысячи тонн, образовавшихся из-за утечек авиационного топлива из хранилищ. Но научных публикаций на эту тему немного [27, 52, 50, 60, 61]. Чаще всего отмечается лишь факт существования “керосиновых линз” без детального обсуждения их генезиса [50, 63]. Расчетная площадь таких образований составляет от десятков до тысяч гектаров, а масса керосина — от тысячи до сотен тысяч тонн. Например, на глубине 2–6 м под аэродромом Чкаловский и расположенными вблизи него жилыми районами Московской области на площади 26 га находится около 20 тыс. т керосина. Глубина возможного просачивания углеводов зависит от ландшафтных условий, варьирует от 1.5 до 5 м и определяется наличием геохимических барьеров [13, 25, 60].

### РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА КАК ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ КЕРОСИНОМ

Ракета-носитель за минуту набирает высоту около 10 км, поэтому время выброса загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы не превышает нескольких секунд. В плотных слоях атмосферы (до высоты 50 км) ракеты-носители сжигают 70–76% всей массы топлива [29]. При старте продукты сгорания топлива образуют облако, которое в течение нескольких минут поднимается до высоты 300–400 м.

При штатном режиме эксплуатации ракет-носителей керосин проливается только в районах падения отработавшей первой ступени из двигателей ступени и бака горючего, которые разрушаются при ударе о землю в специально отведенных для этого районах [28, 29]. Некоторые математические модели [1, 3, 4] допускают выпадение ракетного топлива на поверхность земли после отделения и разрушения второй ступени ракет-носителей на высоте около 30 км. Но результаты многолетнего эколого-геохимического мониторинга в районах падения вторых ступеней ракет-носителей не подтверждают это и отражают отсутствие существенного поступления компонентов ракетных топлив в наземные экосистемы Центрального Казахстана, Алтае-Саянского региона и Северного Урала [8, 15, 24, 42].

### АССИМИЛЯЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПОСТЛИТОГЕННЫХ ПОЧВ В ОТНОШЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ КЕРОСИНОМ

Оценка степени загрязнения почв нефтепродуктами в России стоит достаточно остро, так как нормативы утверждены только для бензина (СанПиН 1.2.3685-21). Зачастую разработанные в разных странах нормативы занижены, так как обеспечивают чрезмерную защиту. Кроме того, обоснованию

нормативов препятствует отсутствие для целевого вещества релевантной информации о токсичности для человека и экосистемы, а также способности почв к естественному самоочищению [54]. В этой связи очень востребованы знания естественных уровней ассимиляционного потенциала почв [6]. Подобные материалы должны лежать в основе и региональных предельно-допустимых концентраций керосина для почв, отличающихся по гранулометрическому составу, гумусированности и вариантам использования – приуроченности к той или иной функциональной зоне [21].

В хвойно-широколиственных лесах южной тайги в зависимости от чувствительности отдельных видов высших растений безопасный пороговый уровень загрязнения керосином дерново-подзолистых почв Калужской области составляет 1–5 г/кг [46], а буроземов Дальнего Востока – 5–25 г/кг [45]. Мохово-лишайниковый ярус обоих сообществ устойчивее к поступлению керосина, за год полностью восстановился или даже увеличил покрытие за счет снижения конкуренции со все еще страдающими от загрязнения сосудистыми растениями. Наиболее чувствительны к воздействию керосина в обоих сообществах южнотаежных ландшафтов травянистые *Athyrium filix-femina*, *Ajuga reptans*, *Eriophorum vaginatum*. Устойчивее их кустарнички с одревесневающими побегами (*Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*) и мхи (*Sphagnum* spp., *Atrichum undulatum*, *Plagiomnium undulatum* и др.). По неопубликованным данным авторов настоящей статьи, пороговый уровень загрязнения песчаных пустынных и бурых аридных почв керосином, вызывающий значимые отклонения в структуре поlynных сообществ космодрома Байконур, лежит в интервале между 5 и 10 г/кг. Критический уровень воздействия керосина, вызывающий полную деградацию этого сообщества и отсутствие возобновления растений в течение года, лежит в интервале между 25 и 100 г/кг. Наблюдаемый на штатных местах падения ракет-носителей “Союз” уровень загрязнения почв керосином, соответствующий сигнальному уровню 1 по [21], при котором не требуется очистка загрязненного субстрата, может снизиться до уровня ниже предела чувствительности высокоселективного метода анализа (газовой хромато-масс-спектрометрии) за несколько лет под действием микроорганизмов и абиотических факторов среды.

В лабораторном эксперименте с песчаными пустынными почвами Казахстана, которые периодически увлажнялись и проветривались, через 3 сут после внесения 10 и 100 г/кг керосина его концентрация составила 65–80% от внесенной, через 90 сут – 28–66, через 180 сут – 3–78, через 365 сут – < 2% [58, 59]. В колоночном эксперименте сухие образцы аридных почв (дюнный песок, супесчаные красноцветные почвы Средиземноморья и

пылеватые суглинистые сероземы) за 50 сут только за счет испарения теряли 60–70% от исходной массы углеводородов с 13–15 атомами С и 87–99.5% соединений с 9–10 атомами С [38].

При незначительном влиянии нагрузок 1–100 г/кг керосина на физико-химические свойства дерново-подзолистых и песчаных пустынных почв [58, 59], даже небольшие количества керосина (1 г/кг) негативно сказывались на высшей растительности и в меньшей мере – на почвенной микробиоте. За год активность целлюлозолитических микроорганизмов и аэробов дерново-подзолистых и песчаных пустынных почв восстановилась до фонового уровня при нагрузке керосина 10 г/кг и все еще отличалась от фоновой при нагрузке 25 г/кг и выше [26]. Аналогичные результаты получены при анализе состава всего микробного консорциума на уровне семейств и типов бактерий этих почв по секвенированию вариабельных регионов V3V4 и V4V5 генов 16S рибосомной рибонуклеиновой кислоты [58, 59].

В последнее время для нормирования качества почв предлагают использовать разделение углеводородов по эквивалентному числу атомов углерода в соответствии с ISO-11504-2017 [54]. Отдельно стоит отметить, что керосиновая фракция с эквивалентным числом атомов углерода около 10 в алифатических углеводородах является наиболее благоприятным субстратом для микробной ремедиации и воздействия таких окислителей, как  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и  $\text{MgO}_2$  [64].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Штатный режим эксплуатации авиакосмической техники не провоцирует масштабного и длительно существующего загрязнения почв керосином. Загрязнение керосином наземных экосистем технологически предусмотрено в районах падения отработавших первых ступеней ракет-носителей. Во всех остальных случаях и в авиации, и в космонавтике проливы керосина на почву – это нештатная ситуация, возникающая, например, в результате недосмотра, халатности и нарушения различных регламентов.

Компонентный состав аэрозольных эмиссий из двигателей самолетов и ракет-носителей изучен достаточно детально. При этом в отношении почв отсутствуют публикации с репрезентативными выборками и их статистической обработкой даже по суммарному содержанию нефтепродуктов или керосина в почвах зон воздействия авиационной и ракетно-космической техники.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы кафедры геохимии ландшафтов и

географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова № 1.4 “Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов” и проекта РФФИ № 19-29-05206.

### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24090095>

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адам А.М., Архипов В.А., Бурков В.А. Плеханов И.Г., Ткаченко А.С.* Влияние метеорологических условий на распространение аэрозольного облака жидких ракетных топлив // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 6. С. 504–509.
2. *Андреев Я.А.* Оценка загрязнения поверхности почвы и атмосферы при аварийном сбросе авиационного топлива // XIII Всерос. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и образование”. Томск, 2006. Т. 6. Ч. 2. С. 3–7.
3. *Архипов В.А., Березиков А.П., Ткаченко А.С., Усанина А.С.* Обобщенная модель распространения жидко-капельного облака при аварийном сбросе авиационного топлива // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2010. Т. 53. № 12/2. С. 10–13.
4. *Архипов В.А., Жаров И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С.* Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 1. С. 89–93.
5. *Асатуров М.Л.* Загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах. СПб.: Университет ГА, 2010. 94 с.
6. *Бабаев М.П., Исмаилов Н.М., Наджафова С.И., Кейсерухская Ф.Ш., Оруджева Н.И.* К вопросу о разработке ПДК нефти и нефтепродуктов в различных типах почв на основе их ассимиляционного потенциала (на примере почв Азербайджана) // *Почвоведение*. 2020. № 11. С. 1393–1400. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110040>
7. *Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю.* Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнения грунтов приаэродромной территории // *Вестник МГТУ*. 2019. Т. 22. № 1. С. 64–71. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-712019>
8. *Большаков В.Н., Кузнецова И.А.* Экологический мониторинг в районе падения отделяющихся частей ракет-носителей “Союз” на территории северного Урала // *Биосфера*, 2015. Т. 7. № 2. С. 169–180.
9. *Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф.* Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.
10. *Жариков Г.А., Крайнова О.А., Хаитов М.Р., Марченко А.И.* Разработка микробиологического препарата для биоремедиации почв, загрязненных компонентами ракетных топлив // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2022. Т. 24. № 3. С. 27–38. <https://doi.org/10.47183/mes.2022.031>
11. *Завгородняя Ю.А., Соколова Д.С.* Содержание летучих углеводородов в нефтезагрязненных ландшафтах Западной Сибири // *Георесурсы, геонергетика, геополитика*. 2011. № 1(3). 10 с. (электронное издание) (Content of volatile hydrocarbons in contaminated landscapes of Western Siberia)
12. *Иванова А.Р.* Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия // *Тр. Гидрометцентра России*. 2017. Вып. 365. С. 5–14.
13. *Качинский ВЛ., Завгородняя Ю.А., Геннадиев А.Н.* Загрязнение арктических почв острова Большой Ляховский (Новосибирские острова) // *Почвоведение*. 2014. № 2. С. 155–168.
14. *Коробова О.С., Филиппова Д.В.* Воздействие объектов гражданской авиации на окружающую среду на примере международного аэропорта “Шереметьево” // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 5. С. 299–305.
15. *Королева Т.В., Шаранова А.В., Кадетов Н.Г., Черницова О.В.* Эколого-геохимические исследования на территориях, подверженных воздействию ракетно-космической деятельности (Северо-Западный Алтай) // *География и природные ресурсы*. 2015. № 1. С. 71–79.
16. *Кочетова Ж.Ю.* Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // *Географический вестник*. 2019. № 3(50). С. 79–91.
17. *Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Николаев Е.В., Славин А.В.* Механизмы микробиологической деструкции углеводородного топлива и других нефтепродуктов микромицетами (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3(60). С. 66–71. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-3-66-71>
18. *Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О.* Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) //

- Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 126–132. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-126-132>
19. Мессинева Е.М., Фетисов А.Г., Мануйлова Н.Б. Воздействие предприятий аэропорта “Шереметьево” на состояние воздушной среды // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 5. С. 64–70. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-64-70>
  20. Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестности аэропорта. М.: Минтранс России- Минэкологии России, 1992. 56 с.
  21. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.
  22. Питулько В.М., Кулибаба В.В. Реновация природных систем и ликвидация объектов прошлого экологического ущерба. М.: ООО “Научно-издательский центр ИНФРА-М”, 2017. 497 с. [https://doi.org/10.12737/monography\\_592d719605d0e6.49777507](https://doi.org/10.12737/monography_592d719605d0e6.49777507)
  23. Прохоров А.В., Янов А.Ю. Модель негативного экологического влияния летательных аппаратов на селитебную зону в районе расположения аэропортов // Universum: Технические науки: электронный научный журн. 2014. № 7 (8).
  24. Пузанов А.В., Горбачев И.Н., Архипов И.А. Оценка воздействия РКД на экосистемы Алтае-Саянской горной страны (1998-2010 годы) // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 5. С. 262–264.
  25. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: МГУ, 1998. 376 с.
  26. Шарипова А. В., Семенов И. Н., Кречетов П. П., Леднев С. А., Королева Т. В. Влияние керосина на целлюлозолитическую активность дерново-подзолистой и песчаной пустынной почв (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 244–251. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020113>
  27. Шкапенко В.В., Кадошников В.М., Мусич Е.Г., Парамонова Н.К., Единач А.В. Трансформация керосина в грунтах под действием почвенных микроорганизмов // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. 2016. Вип. 25. С. 98–105.
  28. Экологическая безопасность ракетно-космической деятельности / Под ред. Касимова Н.С. и др. М.: Спутник+, 2015. 304 с.
  29. Экологический мониторинг ракетно-космической деятельности / Под ред. Касимова Н.С. и др. М.: Рестарт, 2011. 472 с.
  30. Aguelmous A., El Fel L., Souabi S., Zamata M., Yasri A., Lebrihi A., Hafidi M. Petroleum sludge bioremediation and its toxicity removal by landfill in gunder semi-arid conditions // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. V. 166. P. 482–487. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.106>
  31. Anderson B.E., Chen G., Blake D.R. Hydrocarbon emissions from a modern commercial airliner // Atmospheric Environment. 2006. V. 40. № 19. P. 3601–3612. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.072>
  32. Balint A., Belvarner G., Gyarmati B. Monitoring of the kerosene and cadmium contaminated soil near the airport // Scientific Technical and Art Releases. Óbuda University, 2020. P. 6–10.
  33. Beliatskii I.V., Samoylenko V.M., Kozlov A.N. The problem of risk management for flight safety in the field of aviation fuel supply of air transportation // Civil Aviation High Technologies. 2023. V. 26. № 5. P. 8–18. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-5-8-18>
  34. Bendtsen K.M., Bengtsen E., Saber A.T., Vogel U. A review of health effects associated with exposure to jet engine emissions in and around airports // Environ. Health. 2021. V. 20. № 1. P. 10. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00690-y>
  35. Dakhel P.M., Lukachko S.P., Waitz I.A., Miakel-Lye R.C., Brown R.C. Postcombustion evolution of soot properties in an aircraft engine // J. Propulsion Power. 2007. V. 23. № 5. P. 942–948. <https://doi.org/10.2514/1.26738>
  36. Demirdjian B., Ferry D., Suzanne J., Popovicheva O.B., Persiantseva N.M., Shonija N.K. Heterogeneities in the microstructure and composition of aircraft engine combustor soot: impact on the water uptake // J. Atmospheric Chem. 2007. V. 56. P. 83–103. <https://doi.org/10.1007/s10874-006-9043-9/>
  37. Federal Aviation Administration. Aviation and Emissions. A Primer. Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy. 2005. [http://www.faa.gov/regulations\\_policies/policy\\_guidance/envir\\_policy/media/aepimer.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/aepimer.pdf)
  38. Galin Ts., Gerstl Z., Yaron B. Soil pollution by petroleum products, III. Kerosene stability in soil columns as affected by volatilization // J. Contaminant Hydrology. 1990. V. 5. P. 375–385.
  39. Jarsjö J., Destouni G., Yaron B. Retention and volatilisation of kerosene: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils // J. Contaminant Hydrology. 1994. V. 17. P. 167–185.
  40. Karthikeyan R., Mankin K. R., Davis L.C., Erickson L. E. technical note: fate and transport of jet fuel (JP-8) in soils with selected plants // Int. J. Phytoremed.. 2003. V. 5. № 4. P. 281–292. <http://dx.doi.org/10.1080/15226510309359038>
  41. Kinsey J. S., Hays M. D., Dong Y., Williams D. C., Logan R. Chemical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1 to 3 // Environ. Sci. Technol. 2011. V. 45. № 8. P. 3415–3421. <https://doi.org/10.1021/es103880d>
  42. Koroleva T., Kречетов P., Семенов I., Шарипова А., Леднев S., Кarpachevskiy A., Kondratyev A., Kasimov N. The environmental impact of space transport // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2018. V. 58. P. 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.013>

43. Kumar R., De M. Enhanced degradation of petroleum hydrocarbons by *Klebsiella michiganensis* RK and *Acinetobacter baumannii* IITG19 isolated from local soil sources // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. V. 20. P. 13387–13398 <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04790-3>
44. Lam N.L., Smith K.R., Gauthier A., Bates M.N. Kerosene: a review of household uses and their hazards in low- and middle-income countries // J. Toxicology Environ. Health. Part B. 2012. V. 15. P. 396–432. <https://doi.org/10.1080/10937404.2012.710134>
45. Lednev S.A., Semenov I.N., Klink G.V., Krechetov P.P., Sharapova A.V., Koroleva T.V. Impact of kerosene pollution on ground vegetation of southern taiga in the Amur Region, Russia // Sci. Total Environ. 2021. V. 77. P. 144965. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144965>
46. Lednev S.A., Semenov I.N., Koroleva T.V. Phytotoxic effects of kerosene on plants of forest and bog phytocenoses of southern taiga // Forests. 2023. V. 14. № 5. P. 873. <https://doi.org/10.3390/f14050873>
47. Lee D.S., Pitari G., Grewe V., Gierens K., Penner J.E., Petzold A., Prather M.J., Schumann U., Bais A., Bernsten T., Iachetti D., Lim L.L., Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation // Atmospheric Environment. 2010. V. 44. № 37. P. 4678–4734. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>
48. Lindstedt R. P., Maurice L. Q. Detailed chemical-kinetic model for aviation fuels // J. Propulsion and Power. 2000. V. 16. № 2. P. 187–195. <https://doi.org/10.2514/2.5582>
49. Liu G., Yan B., Chen G. Technical review on jet fuel production // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. V. 25. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025>
50. Machackova J., Wittlingerova Z., Vlk K., Zima J. Major factors affecting in situ biodegradation rates of jet-fuel during large-scale biosparging project in sedimentary bedrock // J. Environ. Sci. Health. Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2012. V. 47. № 8. P. 1152–1165. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668379>
51. Masiol M., Harrison R.M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review // Atmospheric Environ. 2014. V. 95. P. 409–455. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
52. Mokalled T., Gerard J.A., Abboud M., Trocquet C., Nasreddine R., Person V., le Calve S. VOC tracers from aircraft activities at Beirut Rafic Hariri International Airport // Atmospheric Poll. Res. 2019. V. 10. P. 537–551. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.009>
53. Peng X., Fan D., Qiu D., Feng S., Peng H., Bai W. Study on RP-3 Aviation Fuel Vapor Concentration // Aerospace. 2023. V. 10. P. 497. <https://doi.org/10.3390/aerospace10060497>
54. Rodrguez M.D.F., Lafarga G.V.T. Soil Quality Criteria for Environmental Pollutants // Encyclopedia of Environmental Health. Elsevier, 2011. P. 124 – 142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00632-2>
55. Ruiz O.N., Brown L.M., Radwan O., Bowen L.L., Gunasekera T.S., Mueller S.S., West Z.J., Striebich R.C. Metagenomic characterization reveals complex association of soil hydrocarbon-degrading bacteria // Int. Biodeterioration Biodegradation. 2021. V. 157. P. 105161 <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105161>
56. Safrilia S., Purwanti I.F. Bioremediation of kerosene contaminated soil with the addition of *Bacillus cereus* bacteria // Asian J. Engineering, Social and Health. 2023. V. 2. № 9. P. 853–864. <https://doi.org/10.46799/ajesh.v2i9.91>
57. Semenov I., Koroleva T. Review on the environmental impact of emissions from space launches: a case study for areas affected by the Russian space programme // Environ. Sci. Poll. Res. 2022. V. 29. P. 89807–89822. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23888-8>
58. Semenov I.N., Shelyakin P.V., Nikolaeva D.D., Tutukina M.N., Sharapova A.V., Lednev S.A., Sarana Y.V., Gelfand M.S., Krechetov P.P., Koroleva T.V. Data on the temporal changes in soil properties and microbiome composition after a jet-fuel contamination during the pot and field experiments // Data in Brief. 2023. V. 46. P. 108860. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108860>
59. Shelyakin P.V., Semenov I.N., Tutukina M.V., Nikolaeva D.D., Sharapova A.V., Sarana Yu V., Lednev S.A., Smolenkov A.D., Gelfand M.S., Krechetov P.P., Koroleva T.V. The influence of kerosene on microbiomes of diverse soils // Life. 2022. V. 12. P. 221. <https://doi.org/10.3390/life12020221>
60. Shpak O.M., Havryliuk R.B., Lohvynenko O.I., Zapolskiy I.M. Assessment of the impact of groundwatertable fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products // Geologičnij žurnal. 2023. V. 2. P. 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>
61. Svoma J., Houzim V. Protection of groundwater from in the vicinity of airports // Environ. Geol. Water Sci. 1984. V. 6. № 1. P. 21–30.
62. Wang L., Cheng Y., Naidu R., Bowman M. The key factors for the fate and transport of petroleum hydrocarbons in soil with related in/ex situ measurement methods: an overview // Front. Environ. Sci. 2021. V. 9. P. 756404. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.756404>
63. Wright W.G., Powell J.D. Preliminary investigation of soil and ground-water contamination at a U.S. army petroleum training facility, Fort Lee, Virginia, September–October 1989. U.S. Geological Survey. Open-File Report 90–387. Richmond, 1990. 28 p.
64. Xie G., Barcelona M.G. Sequential chemical oxidation and aerobic biodegradation of equivalent carbon

- number-based hydrocarbon fractions in jet fuel // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37. P. 4751–4760. <https://doi.org/10.1021/es026260t>
65. Yu Z., Herndon S.C., Ziemba L.D., Timko M.T., Liscinsky D.S., Anderson B.E., Miake-Lye R.C. Identification of lubrication oil in the particulate matter emissions from engine exhaust of in-service commercial aircraft // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. № 17. P. 9630–9637. <https://doi.org/10.1021/es301692t>

## Jet-fuel as a Source of Soil Pollution (Review)

T. V. Koroleva<sup>1</sup>, I. N. Semenov<sup>1, \*</sup>, S. A. Lednev<sup>1</sup>, and O. S. Soldatova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure, Senter 'Yuzhniy', Baikonur, 468320 Kazakhstan*

*\*e-mail: semenov@geogr.msu.ru*

Kerosene is widely used in various types of anthropogenic activities. Its environmental safety is mostly discussed in the context of aerospace activity. At all stages of its life cycle, aerospace activity impact the environment. In aviation, pollution of atmospheric air and terrestrial ecosystems is caused, first of all, by jet-fuel and the products of its incomplete combustion and is technologically specified for a number of models in case of fuel drainage due to an emergency landing. During the rocket and space activity, jet-fuel enters terrestrial ecosystems as a result of fuel spills from engines and fuel tanks at the fall sites of spent first stages of the launch vehicles. Jet-fuel does not enter terrestrial ecosystems from the second and third stages of launch vehicles. The component composition of aerosol emissions from aircraft engines and launch vehicles has been studied in sufficient detail. At the same time, regarding soils, there are practically no publications with representative data sets and their statistical processing not only for the kerosene content, but also for the total petroleum hydrocarbons in soils affected by aerospace activity. Nevertheless, the available data and the results of modeling allow us to assert that during the normal aerospace activity, an acceptable level of hydrocarbons entering is observed into terrestrial ecosystems, which does not exceed the assimilation potential. That is, the incoming amount of jet-fuel disappears quickly enough without causing irreversible damage.

*Keywords:* propellants, rocket and space activity, total petroleum hydrocarbons, volatile organic compounds, Albic Retisols, Calcisols