



Научная статья

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЛИФАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ИХ МИГРАЦИИ ИЗ ПОЧВЫ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ

Эльмира Т. Ермолдина PhD^{ID}, Ерлан А. Бекешев^{ID}, Бибигуль М. Миркаримова* д.т.н.^{ID}, Бахытжан Ш. Бариева к.б.н.^{ID}, Елена Ю. Степанова^{ID}, Аскар М. Муқанов^{ID}, Жансая К. Рымжанова^{ID}

Филиал РГП «Инфракос» в г. Алматы, Алматы, Казахстан; ermoldina@mail.ru (ЭТЕ); chemist_e@mail.ru (ЕАБ); bibigulm@mail.ru (БММ); barievabch@mail.ru (БШБ); s.ell@mail.ru (ЕЮС); askarmukanov85@gmail.com (АММ); Rymzhanova110@gmail.com (ЖКР)

*Автор корреспонденции: Бибигуль М. Миркаримова, e-mail: bibigulm@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ракетно-космическая деятельность, предельные алифатические углеводороды, углеводороды нефти, естественный тип почвы, влагоёмкость, миграция, микроклимат, подпороговая концентрация, наименьшая концентрация

АБСТРАКТ

В статье рассматривается процесс определения подпороговой концентрации (ППК) по воздушно-миграционному показателю вредности, который отражает способность вредных веществ мигрировать из почвы в атмосферный воздух. Установление ППК является важным шагом в оценке рисков для здоровья человека и экосистем, поскольку оно помогает определить безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ. В работе анализируются современные методы исследования, а также учитываются факторы, влияющие на миграцию веществ, такие как температура, влажность и состав почвы. Практическое применение ППК рассматривается в контексте разработки стратегий по снижению загрязнения воздуха и защиты здоровья населения. На основании полученных экспериментальных данных была выбрана величина, близкая к предельно допустимой концентрации (ПДК) для атмосферного воздуха. В этой связи была изучена концентрация алифатических углеводородов, равная 400 мг/кг в почве. Это исследование позволяет оценить потенциальное воздействие таких концентраций на окружающую среду и здоровье человека, а также выявить возможные риски, связанные с загрязнением почвы и воздуха.

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного индустриального общества качество окружающей среды становится все более актуальной темой для научных исследований и общественного обсуждения. Одним из ключевых аспектов охраны здоровья населения и экосистемы в целом является контроль за загрязнением воздуха.

Актуальность данной области исследования подтверждается значительным количеством опубликованных материалов, которые свидетельствуют о растущем интересе учёных и специалистов к этой теме. Увеличение числа публикаций указывает на то, что проблема привлекает внимание научного сообщества и является предметом активных исследований [1...18].

Загрязнение почв нефтепродуктами представляет серьёзную экологическую проблему, особенно в контексте последующего перехода летучих компонентов нефти в атмосферный воздух. Легкие алифатические углеводороды (C_2 - C_{10}) обладают высокой летучестью и способны испаряться из загрязнённой почвы, внося вклад в загрязнение атмосферного воздуха. По оценкам, при разливе нефти до 20...40% её лёгких фракций может удаляться из почвы именно за счёт испарения [9]. Это означает, что значительная доля насыщенных алифатических углеводородов способна мигрировать в воздух,

По статье:

Получено: 26.03.2025

Пересмотрено: 31.07.2025

Принято: 25.08.2025

Опубликовано: 01.10.2025

Для цитирования:

Ермолдина Э., Бекешев Е.,
Миркаримова Б., Бариева Б.,
Степанова Е., Муканов А.,
Рымжанова Ж. Определение
пороговых значений
концентраций алифатических
углеводородов при их
миграции из почвы в
атмосферный воздух и
моделирования // *Гидрометеорология и
экология*, 118 (3), 2025, 66-77.

особенно при наличии благоприятных условий. Действительно, чем короче углеводородная цепь и ниже молекулярная масса, тем выше давление насыщенного пара соединения и тем легче оно переходит в газовую фазу. Таким образом, низкомолекулярные алканы (например, пропан, гексан) слабо сорбируются грунтом и быстро улетучиваются, тогда как более тяжёлые фракции остаются в почве надолго [10]. Эти свойства подтверждаются и практическими наблюдениями: так, в [9] показано, что уже в первые дни после загрязнения почвы происходит интенсивное испарение наиболее летучих компонентов нефти.

Высокая миграционная способность легких углеводородов означает, что путь «почва–атмосфера» является критическим с точки зрения воздействия на качество воздуха и здоровье населения. Отмечается, что на поведение и миграцию углеводородов в почве влияет широкий комплекс факторов – как природных, так и техногенных [11]. В частности, температура окружающей среды, влажность почвы и её гранулометрический состав существенно сказываются на скорости испарения и объёме переходящих в воздух загрязнителей. Повышение температуры ускоряет испарение углеводородов, тогда как высокая влажность способна частично подавлять выход паров за счёт сорбции воды в поровом пространстве. Таким образом, для оценки воздушной миграции необходимо учитывать микроклиматические и почвенные условия, которые могут либо усиливать, либо ограничивать испарение летучих органических соединений из грунта.

В последние 25 лет в научной литературе активно обсуждаются и развиваются экспериментальные методы выявления и количественной оценки миграционных процессов углеводородов из почвы в воздух. Газовая хроматография (ГХ) как метод является «золотым стандартом» для анализа углеводородов благодаря высокой чувствительности и специфичности. С помощью ГХ можно отдельно идентифицировать отдельные алканы в сложной смеси, что важно при изучении состава и происхождения углеводородных выбросов. Например, для оценки нефтяного загрязнения применили ГХ с детектором по ионизации пламени (ГХ-ИД), с помощью которого определяли распределение н-алканов в пробах среды [12]. Газовая хроматография часто сочетается с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС) для более точного определения концентраций. В частности, разработанный Департаментом охраны окружающей среды штата Массачусетс метод Air-Phase Petroleum Hydrocarbons (APH) предусматривает отбор проб воздуха в герметичные канистры с последующим анализом на ГХ-МС, позволяющим количественно измерять содержание летучих алифатических углеводородов в диапазонах C_5 - C_8 и C_9 - C_{12} [13]. Такой подход даёт возможность контролировать концентрации отдельных фракций углеводородов в воздухе с уровнем обнаружения порядка нескольких $мкг/м^3$.

Метод флюкс-камер используется для измерения выбросов углеводородов из почвы. Например, были применены статические камеры для измерения эмиссии C_2 - C_{10} углеводородов из лесных и заболоченных почв, используя газовую хроматографию [14]. Аналогичный метод использовали для измерения выбросов углеводородов с биоремедиационных полигонов нефтеотходов [15]. Эти камеры позволяют точно фиксировать интенсивность миграции углеводородов и состав паров, включая метан и алифатические углеводороды. Кроме того, был использован микрометеорологический подход для измерения флюксов углеводородов с загрязнённых почв с помощью метода флюкс-градиента, установив два уровня для отбора воздуха. Эти данные были использованы для оценки флюксов нефти и углеводородов в атмосферу и демонстрируют использование методов для полевых исследований загрязнённых территорий [16]. Для оперативного мониторинга миграции углеводородов широко используют фотоионизационные газоанализаторы (например, «Колион-1»). Эти приборы позволяют быстро определять суммарную концентрацию летучих углеводородов в воздухе с использованием метода для экспресс-диагностики нефтяных загрязнений [17]. Эти

приборы подходят для быстрого отслеживания изменений концентраций и определения горячих точек загрязнения.

Важной задачей является определение воздушно-миграционного показателя вредности (ВМПВ), подпороговой концентрации предельно алифатических углеводородов в атмосферном воздухе, которая служит индикатором потенциального вредного воздействия загрязняющих веществ на атмосферу и, соответственно, на живые организмы. Подпороговая концентрация представляет собой уровень, ниже которого вещества не оказывают заметного вредного влияния на здоровье и экосистему. Установление таких норм позволяет не только контролировать качество воздуха, но и разрабатывать эффективные меры по его охране. Так, с целью гигиенического обоснования ПДК нефтепродуктов в почве Республики Беларусь, проведён ряд экспериментов по установлению подпороговой концентрации по воздушно-миграционному признаку вредности в тепловых камерах (термостатах), с учетом регионального ландшафтно-геохимического фона (исследовали песчаную почву, обладающую минимальной сорбционной и максимальной фильтрующей способностью), с использованием смеси нефтепродуктов с содержанием углеводородов диапазона C1–C40 (осветительный керосин, топливо дизельное автомобильное, масло промышленное). Анализ проб на содержание углеводородов диапазона C10–C40 проводили газохроматографическим методом, в динамике через 24, 48 и 72 ч. Показано, что при концентрациях нефтепродуктов в почве в дозе, реально встречаемой в почве (150 мг/кг) и в 20 раз ее превышающей (3000 мг/кг), уровень миграции их в воздух не превышал установленной среднесуточной ПДК атмосферного воздуха (0.4 мг/м^3) для углеводородов алифатического ряда C11–C19. Следовательно, подпороговой концентрацией нефтепродуктов в почве по воздушно-миграционному показателю вредности является величина 3000 мг/кг [18].

Обзор литературы показывает, что за последние десятилетия разработаны методы для изучения миграции алифатических углеводородов из почвы в атмосферу. Выявлены факторы, влияющие на процесс испарения (температура, влажность, состав почвы), а также методы, позволяющие обнаруживать даже низкие концентрации углеводородных паров, включая полевые детекторы и хроматографию. Однако остаётся открытым вопрос минимальной концентрации углеводородов в почве, при которой их миграция в воздух становится опасной. Гигиенические нормативы по ВМПВ являются необходимым инструментом для оценки и регулирования уровня загрязнения воздуха. Они помогают установить безопасные пределы концентрации различных веществ в атмосфере, что, в свою очередь, способствует защите здоровья населения. Понимание этих норм и их применение на практике позволит более эффективно справляться с проблемами загрязнения и обеспечивать устойчивое развитие общества.

Понятие загрязнения атмосферного воздуха дано в Законе Республики Казахстан от 11 марта 2002 года № 302-III «Об охране атмосферного воздуха»: загрязнение атмосферного воздуха это поступление в атмосферный воздух или образование в нем вредных веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха [19]. В качестве гигиенических нормативов выступают предельно допустимые концентрации (ПДК) – количество единиц массы загрязняющего вещества на единицу объёма воздуха (мг/м^3), принимаемое за 1 ПДК. В соответствии с Методическими рекомендациями по гигиеническому обоснованию предельно допустимых концентраций химических веществ в почве (№ 2609-82 от 5 августа 1982 г.), на основании полученных экспериментальных данных берётся величина близкая к максимальной разовой ПДК для атмосферного воздуха [20].

Исследование, проведённое в рамках данной работы, направлено на определение подпороговых значений концентраций углеводородов (C₂–C₁₀) и обоснование нового показателя вредности, характеризующего способность химического вещества

(нефтепродукты) переходить из почвы в атмосферный воздух, что заполняет пробел в знаниях и предоставляет основу для экологического нормирования.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с Методическими рекомендациями по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве № 2609-82, проведено три серии экспериментов по определению воздушно-миграционного показателя вредности (ВМПВ) при миграции определенного количества нефтепродуктов из почвы (изучены почвы Центрального Казахстана). Применен метод моделирования воздушной миграции нефтепродуктов из почвы в термостатах, в сравнении с предельно допустимой концентрацией (ПДК) алифатических углеводородов группы C_1 - C_{10} полученных среднесуточных концентраций углеводородов в воздухе [20].

В связи с отсутствием в Казахстане установленных значений предельно допустимой разовой концентрации углеводородов в воздухе, было решено ориентироваться на ПДК алифатических углеводородов группы C_1 - C_{10} , которая составляет 300 мг/м^3 , согласно Гигиенических нормативов к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, на территориях промышленных организаций (утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02.08.2022 г. №КР ДСМ-70).

Материалы.

Для эксперимента использована единая проба бурой солонцеватой почвы с плотным глинистым механическим составом, отобранная в 2024 г. в точке с координатами $47^{\circ}35'24,6''$ с.ш., $67^{\circ}49'05,4''$ в.д. в Улытауском районе области Ұлытау (Центральный Казахстан), с содержанием 60 мг/кг нефтепродуктов (выявлено флуориметрическим методом, ПНД Ф 16.1.21-98, с использованием прибора «Флюорат-02-3М», производства ООО «ЛЮМЭКС», Россия). Предварительно в этом же образце естественной почвы были также определены основные агрохимические свойства (рН, гумус, влагоёмкость), по общепринятым методикам.

Методы.

В соответствии с Методическими рекомендациями № 2609-82, проведены стационарные (лабораторные) эксперименты по определению подпороговой концентрации нефтепродуктов в почве по миграционному воздушному показателю, с применением тепловых камер (термостатов), на дне которых расположен лоток с почвой, загрязненной нефтепродуктами в трех концентрациях - 60 мг/кг нефтепродуктов в первом образце (фоновая концентрация, реально встречаемая в почве исследуемого региона), 1200 мг/кг нефтепродуктов во втором образце (максимальная концентрация с превышением фона в 20 раз), 400 мг/кг нефтепродуктов в третьем образце почвы (промежуточная концентрация между фоновой и максимальной). В экспериментах пробы почвы искусственно загрязнялись углеводородным ракетным горючим (УВГ).

Изучение миграции нефтепродуктов в количестве 60 мг/кг , 1200 мг/кг и 400 мг/кг из почвы в воздух проводилось в суховоздушном термостате при соблюдении следующих условий:

- диапазон изменения влажности от 10 до $100 \pm 5\%$;
- диапазон изменения температуры от 20 до $50 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$;
- объем камеры должен быть не менее 0.05 м^3 .

Обработка почвы.

Почва массой $0,5 \text{ кг}$, предварительно высушенная до воздушно-сухого состояния, и очищенная от посторонних включений (камни, корни растений и т.д.), была пропущена через сито с диаметром отверстия $2...3 \text{ мм}$, затем помещена в вакуумный эксикатор с пришлифованными крышками и пробками, оснащёнными двумя отводами для отбора воздуха и дальнейшего анализа содержания предельных алифатических углеводородов группы C_2 - C_{10} , при температуре 50°C и увлажнении почвы до 10% и 60% от полной влагоёмкости. Таким образом, были созданы контролируемые условия микроклимата,

способствующие максимальному переходу исследуемого вещества в нижний слой атмосферы, что актуально для оценки миграции нефтепродуктов из почвы.

Пробы воздуха отбирали через 24 часа после загрузки эксикатора, а затем на 2, 3, 4, 5, 6 и 7 сутки, для каждой исследуемой концентрации нефтепродуктов в почве (60 мг/кг, 1200 мг/кг, 400 мг/кг). Измерения концентрации паров углеводородов в воздухе проведены с помощью газоанализатора ГАНК-4, с применением метода фотоионизационного детектирования, обеспечивающего высокую точность измерений. Измерения проводились четыре раза в сутки, обеспечивая динамическое наблюдение с интервалами в три часа.

Обработка данных.

Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью стандартных методов математической статистики для расчета среднего арифметического показателя (среднесуточная концентрация углеводородов в воздухе) по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}, \quad (1)$$

где x – значение повторностей определения, n – количество повторностей (в Excel: =СРЗНАЧ (массив значений X)).

Среднеквадратичное отклонение от среднего (в Excel: =СТАНДОТКЛОН (массив значений X)) рассчитано по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образец почвы с содержанием 60 мг/кг нефтепродуктов. В первые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в воздухе при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 56.9 ± 0.013 мг/м³. При влажности 10% концентрация углеводородов была немного ниже и составила 54.1 ± 0.039 мг/м³.

На вторые сутки среднесуточная концентрация при влажности 60% составила 51.4 ± 0.019 мг/м³, при влажности 10% - 105.5 ± 0.032 мг/м³.

На третьи сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% составила 52.4 ± 0.017 мг/м³, при влажности 10% - 105.7 ± 0.018 мг/м³.

На четвертые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% составила 52.1 ± 0.089 мг/м³, при влажности 10% - 105.8 ± 0.033 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на пятые сутки составила 55.9 ± 0.044 мг/м³ при влажности 60%, при влажности 10% - 102.0 ± 0.014 мг/м³.

На шестые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов составила 44.0 ± 0.079 мг/м³ при влажности 60%, при влажности 10% - 70.2 ± 0.046 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на седьмые сутки при влажности 60% составила 48.5 ± 0.076 мг/м³, при влажности 10% - 51.7 ± 0.052 мг/м³.

Таким образом, согласно результатам проведённого анализа (таблица 1, рисунок 1), в естественном типе почвы с содержанием 60 мг/кг нефтепродуктов, при миграции предельных алифатических углеводородов из почвы в атмосферу наименьшая (лимитирующая) среднесуточная концентрация предельных углеводородов составила 44.0 мг/м³ при 60% влажности от полной влагоёмкости и 51.7 мг/м³ при 10% влажности. Незначительная разница в среднесуточных концентрациях указывает на незначительное

влияние уровня влажности на миграционные процессы в почвенной среде с плотным глинистым составом и их потенциальное воздействие на атмосферу, что уточняет выводы, сделанные ранее [11].

Таблица 1

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в атмосферном воздухе (C_2-C_{10}) (естественный тип почвы с содержанием 60 мг/кг нефтепродуктов)

Период	Результаты измерения предельных алифатических углеводородов $C_2 - C_{10}$ (мг/м ³)	
	Среднесуточная концентрация	
	60 %	10 %
1 сутки	56.9 ± 0.013	54.1 ± 0.039
2 сутки	51.4 ± 0.019	105.5 ± 0.032
3 сутки	52.4 ± 0.017	105.7 ± 0.018
4 сутки	52.1 ± 0.089	105.8 ± 0.033
5 сутки	55.9 ± 0.044	102.0 ± 0.014
6 сутки	44.0 ± 0.07	70.2 ± 0.046
7 сутки	48.5 ± 0.07	51.7 ± 0.052

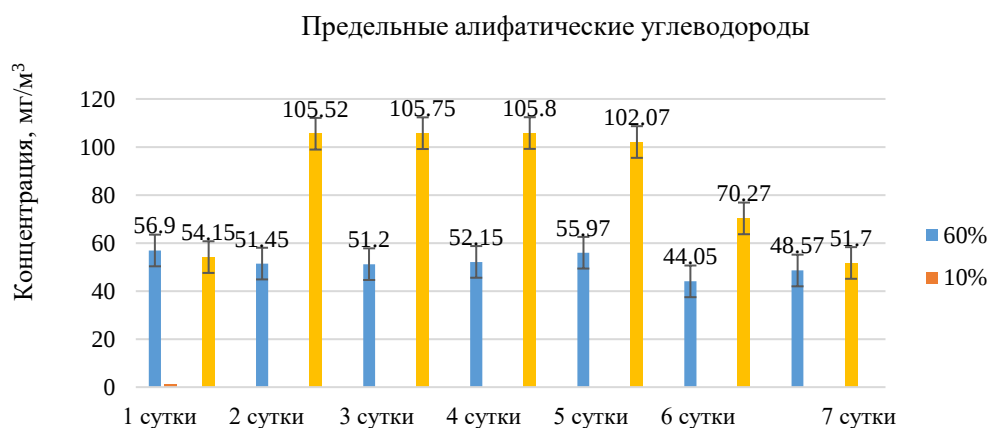


Рисунок 1. Среднесуточная концентрация углеводородов (C_2-C_{10}) в воздухе (60 мг/кг нефтепродуктов в почве)

Образец почвы с содержанием 1200 мг/кг нефтепродуктов. Полученная среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 5798.2 ± 0.0084 мг/м³, при влажности 10% - 3689.0 ± 0.047 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на вторые сутки при влажности 60% составила 5279.7 ± 0.015 мг/м³, при 10% влажности - 4243.2 ± 0.025 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% на третьи сутки составила 5123.0 ± 0.033 мг/м³, при влажности 10% - 2552.2 ± 0.028 мг/м³.

На четвертые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 4197.5 ± 0.035 мг/м³, при влажности 10% - 2570.0 ± 0.024 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на пятые сутки при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 3237.0 ± 0.014 мг/м³, при влажности 10% - 1611.0 ± 0.039 мг/м³.

На шестые сутки при влажности 60% от полной влагоёмкости среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов составила 2025.5 ± 0.047 мг/м³, при влажности 10% - 1038.0 ± 0.092 мг/м³.

Полученная среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% от полной влагоёмкости на седьмые сутки составила 1108.0 ± 0.022 мг/м³, при влажности 10% - 915.2 ± 0.048 мг/м³. Результаты измерения среднесуточной концентрации предельных алифатических углеводородов в воздухе при миграции из почвы, загрязненной 1200 мг/кг нефтепродуктов (в 20 раз превышающая первую концентрацию 60 мг/кг) представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в атмосферном воздухе ($C_2 - C_{10}$) (1200 мг/кг нефтепродуктов в почве)

Период	Результаты измерения предельных алифатических углеводородов	
	$C_2 - C_{10}$ (мг/м ³)	
	Среднесуточная концентрация	
	60 %	10 %
1 сутки	5798.2 ± 0.0084	3689.0 ± 0.047
2 сутки	5279.7 ± 0.015	4243.2 ± 0.025
3 сутки	5123.0 ± 0.033	2552.2 ± 0.028
4 сутки	4197.5 ± 0.035	2570.0 ± 0.024
5 сутки	3237.0 ± 0.014	1611.0 ± 0.039
6 сутки	2025.5 ± 0.047	1038.7 ± 0.092
7 сутки	1108.2 ± 0.022	915.2 ± 0.048

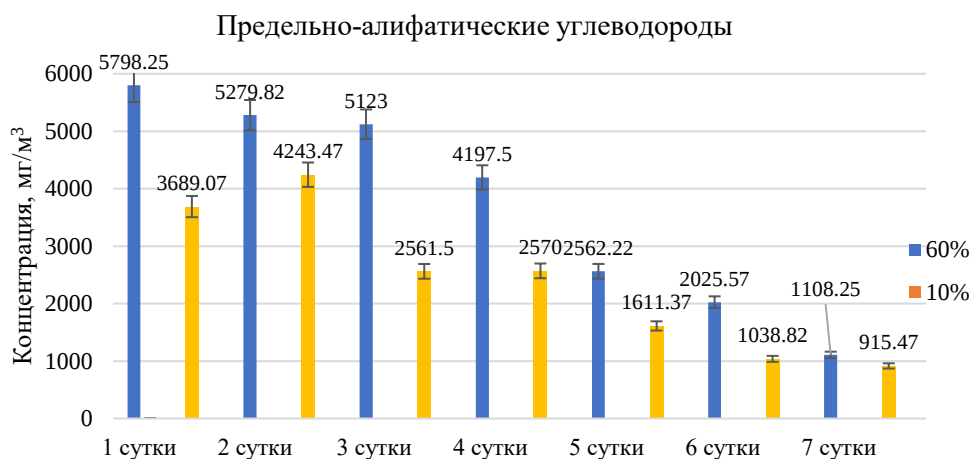


Рисунок 2. *Среднесуточная концентрация углеводородов ($C_2 - C_{10}$) в воздухе (1200 мг/кг нефтепродуктов в почве)*

Таким образом, при концентрации 1200 мг/кг нефтепродуктов в бурой солонцеватой суглинистой почве, наименьшая среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в воздухе (лимитирующий показатель) составляет 1108.0 ± 0.022 мг/м³ при влажности 60%, 915.2 ± 0.048 мг/м³ при 10% влажности, что превышает ПДК=300 мг/м³ в несколько раз. Это значительно отличается от результатов, полученных В.М. Рубин с соавторами (2013), когда при миграции нефтепродуктов 150 и 3000 мг/кг в песке, концентрация углеводородов в воздухе не превышала ПДК=0.4 мг/м³.

Образец почвы с содержанием 400 мг/кг нефтепродуктов. Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в воздухе на первые сутки, при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 604.0 ± 0.022 мг/м³, а при влажности 10% - 584.9 ± 0.082 мг/м³.

На вторые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% составила 497.6 ± 0.078 мг/м³, а при влажности 10% - 373.5 ± 0.044 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% на третьи сутки составила 388.5 ± 0.08 мг/м³, при влажности 10% - 273.4 ± 0.051 мг/м³.

На четвертые сутки среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов при влажности 60% составила 384.0 ± 0.063 мг/м³, при влажности 10% - 261.5 ± 0.021 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на пятые сутки при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 319.8 ± 0.048 мг/м³, при влажности 10% - 245.0 ± 0.091 мг/м³.

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов на шестые сутки составила 306.7 ± 0.038 мг/м³ при влажности 60% от полной влагоёмкости, при влажности 10% - 248.0 ± 0.052 мг/м³.

Результаты седьмых суток показывают, что среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов, при влажности 60% от полной влагоёмкости составила 302.0 ± 0.013 мг/м³, при влажности 10% - 247.9 ± 0.026 мг/м³, что соответствовало ПДК=300 мг/м³.

Результаты измерения среднесуточной концентрации предельных алифатических углеводородов в воздухе при миграции из почвы, загрязненной 400 мг/кг нефтепродуктов представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3

Среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в атмосферном воздухе ($C_2 - C_{10}$) (400 мг/кг нефтепродуктов в почве)

Период	Результаты измерения предельных алифатических углеводородов $C_2 - C_{10}$ (мг/м ³)	
	Среднесуточная концентрация	
	60%	10%
1 сутки	604.0 ± 0.022	584.9 ± 0.082
2 сутки	497.6 ± 0.073	373.5 ± 0.044
3 сутки	388.5 ± 0.08	273.4 ± 0.051
4 сутки	384.0 ± 0.063	261.5 ± 0.021
5 сутки	319.8 ± 0.048	245.0 ± 0.091
6 сутки	306.7 ± 0.038	248.0 ± 0.052
7 сутки	302.0 ± 0.013	247.9 ± 0.026

Сравнительный анализ результатов экспериментов с тремя концентрациями нефтепродуктов в почве показал следующее:

- при воздушной миграции концентрации 60 мг/кг (реально встречаемое содержание в почве нефтепродуктов), наименьшая (лимитирующая) среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов группы $C_1 - C_{10}$ в воздухе составила 44.0 мг/м³ и 51.7 мг/м³ (60% и 10% влажности от полной влагоёмкости, соответственно), что значительно ниже экологической нормы ПДК=300 мг/м³;

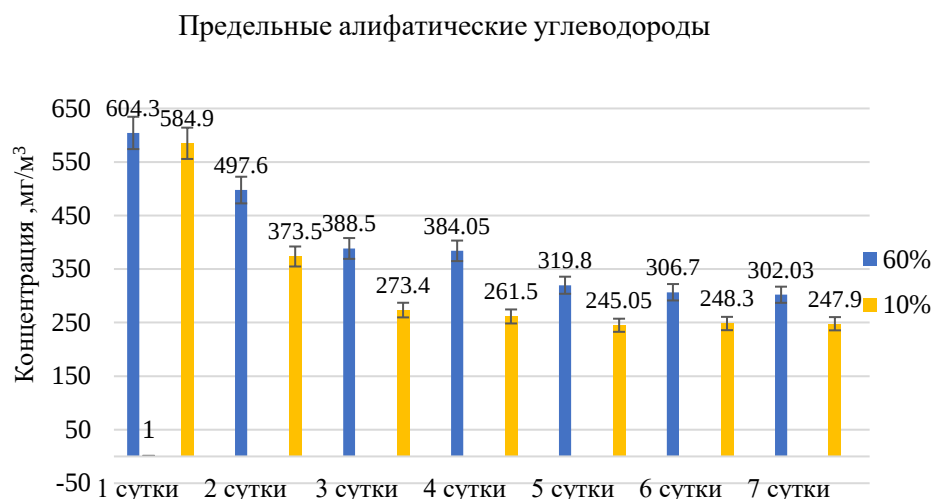


Рисунок 3. Среднесуточная концентрация углеводородов (C_2 - C_{10}) в воздухе (400 мг/кг нефтепродуктов в почве)

- при концентрации 1200 мг/кг нефтепродуктов в почве (в 20 раз превышает реальную концентрацию 60 мг/кг) наименьшая (лимитирующая) среднесуточная концентрация предельных алифатических углеводородов в воздухе составляет 1108.0 мг/м³ и 915.2 мг/м³ (60% и 10% влажности от полной влагоёмкости, соответственно), что значительно превышает ПДК=300 мг/м³;

- при концентрации в почве 400 мг/кг нефтепродуктов, наименьшая (лимитирующая) среднесуточная концентрация предельных алифатических группы C_1 - C_{10} в воздухе составила 302.0 мг/м³ и 247.9 мг/м³ (60% и 10% влажности от полной влагоёмкости, соответственно), что соответствует ПДК=300 мг/м³.

Результаты проведенного исследования не только подтверждают выводы о воздействии микроклиматических и почвенных условий на испарение летучих органических соединений из грунта, сделанные рядом авторов [9, 11, 18], но и позволяют отметить ослабление миграционных процессов за счет морфологических свойств бурой солонцеватой почвы с плотным глинистым механическим составом (преимущественно поглощение нефтепродуктов истыми компонентами), без существенных различий в уровне увлажненности почвенных слоев (60% или 10% от общей влагоёмкости), что характерно для исследуемого региона (Центральный Казахстан).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет определить концентрацию 400 мг/кг нефтепродуктов (углеводородное ракетное горючее) в почве (рассмотрен естественный тип почвы Центрального Казахстана - бурая солонцеватая с плотным глинистым составом) в качестве воздушно-миграционного показателя вредности (ВМПВ), который служит критерием для оценки безопасных уровней загрязняющих веществ в окружающей среде, при проведении дальнейших исследований и оценке экологических рисков, связанных с миграцией этого вещества из почвы в воздух.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из открытых источников.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЭТЕ; управление данными – ЕАБ, БШБ; формальный анализ – ЭТЕ, ЕАБ, БММ, ЕЮС, ЖКР; методология – ЭТЕ, ЕАБ; руководство – ЭТЕ; визуализация – БШБ, БММ; написание исходного текста – ЕАБ, БММ, БШБ; написание и редактирование окончательного текста – ЭТЕ, ЕАБ, ЕЮС, АММ, ЖКР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проведены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP19679969 «Исследование процессов идентификации ракетного углеводородного топлива в почвах районов эксплуатации ракет-носителей и разработка их гигиенического норматива», послужат основой разработки гигиенического норматива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Просвирыкова И.А., Шевчук Л.М. Гигиеническая оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными твердыми частицами на здоровье населения // Медицина труда и экология человека. – 2018. - 3(15). – С. 28-32.
2. Послание Президента Федеральному Собранию 21 февраля 2023 г. - URL <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/70565> (дата обращения 21.02.2023).
3. Загрязнение атмосферного воздуха // Информационный бюллетень ВОЗ. - URL [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-andhealth](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-andhealth) (дата обращения 21.02.2023).
4. Как загрязнение воздуха разрушает наше здоровье / Центр СМН ВОЗ. - URL <https://www.who.int/ru/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (дата обращения = accessed 21.02.2023).
5. Kuklinska K., Jacek W., Namiesnik J. Air Quality Policy in the U.S. and the EU // A Review. Atmospheric Pollution Research. – 2015. – 6. - P. 129-137. - doi:10.5094/APR.2015.015.
6. Нерсисян Е.Н., Бокерия С.А. Экологические инициативы Франции // Этносоциум и межнациональная культура. - 2018. - № 5(119). – С. 137-147.
7. Шкодинский С.В., Рыкова И.Н., Юрьева А.А. Опыт отдельных зарубежных стран в сфере снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух // Вестник Московского государственного областного университета. - Серия: Экономика. - 2021. - 4:118-132. doi:10.18384/2310-6646-2021-4-118-132.
8. Лыжин Д.Н. Климатическая политика США: проблемы и перспективы глобального лидерства // Проблемы национальной стратегии. – 2021. - 3(66). - С. 221-245. - doi:10.52311/2079-3359_2021_3_221.
9. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. - СПб., 2000. – 273 стр.
10. U.S. EPA (2010–2021). Exposure Assessment Tools by Chemical Classes – Hydrocarbons. EPA ExpoBox. (Summary of volatility of aliphatic hydrocarbons).
11. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. - 2015. - № 10. - С. 1195-1209.
12. Rashad A.M. et al. Monitoring organic pollutants from aliphatic hydrocarbons in soil samples within the shoreline in Gulf of Suez // Egypt. J. Petroleum. - 2024. - Vol. 33, No. 1. - Article 3.
13. MassDEP. Method for the Determination of Air-Phase Petroleum Hydrocarbons (APH). Massachusetts Dep. of Environ. Protection, Rev. 1. - 2009. - 54 p.
14. Hellén H. et al. C2-C10 hydrocarbon emissions from a boreal wetland and forest floor // Biogeosciences. - 2006. - Vol. 3, No. 2. - P. 167-174.
15. Lyman S.N., Mansfield M.L. Organic compound emissions from a landfarm used for oil and gas solid waste disposal // J. Air Waste Manage. Assoc. - 2018. - Vol. 68, No. 7. - P. 637-642.
16. Ausma S. et al. Volatile hydrocarbon emissions from a diesel fuel-contaminated soil bioremediation facility // J. Air & Waste Manage. Assoc. - 2002. - Vol. 52, No. 7. - P. 861-870.
17. Safarov A.M. et al. RU Patent 2519079C1: Method for express-detection of soil and groundwater pollution by oil and petroleum products. – 2014.
18. Рубин В.М., Илькова И.И., Кремко Л.М., Присмотров Ю.А., Самсонова А.С., Володько И.К., Лукашев О.В. Гигиеническое обоснование нормативов ПДК нефтепродуктов в почвах Республики Беларусь // Гигиена и санитария. – 2013. – С. 99-101.
19. Закон Республики Казахстан от 11 марта 2002 года № 302-III «Об охране атмосферного воздуха».
20. Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве. Изд. 2-е: утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР В.Е. Ковшило (№2609-82 от 5 августа 1982 г.).

REFERENCES

1. Prosviryakova I.A., Shevchuk L.M. Gigenicheskaya otsenka vliyaniya zagryazneniya atmosfornogo vozdukha melkodispersnymi tverdymi chastitsami na zdorov'e naseleniya. Meditsina truda i ekologiya cheloveka. – 2018. - 3(15) – P. 28-32 [In Russian].
2. Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu 21 fevralya 2023 goda. - URL <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/70565> (data obrashcheniya 21.02.2023) [In Russian].
3. Zagryaznenie atmosfornogo vozdukha // Informatsionnyi byulleten' VOZ. - URL [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-andhealth](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-andhealth) (data obrashcheniya 21.02.2023) [In Russian].
4. Kak zagryaznenie vozdukha razrushaet nashe zdorov'e / Tsentri SMI VOZ. - URL <https://www.who.int/ru/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (data obrashcheniya = accessed 21.02.2023) [In Russian].
5. Kuklinska K., Jacek W., Namiesnik J. Air Quality Policy in the U.S. and the EU // A Review. Atmospheric Pollution Research. – 2015. – 6. - P. 129-137. doi:10.5094/APR.2015.015 [In Russian].
6. Nersesyan E.N., Bokeriya S.A. Ekologicheskie initsiativy Frantsii // Etnosotsium i mezhnatsional'naya kul'tura. – 2018. - № 5(119). -P. 137-147 [In Russian].
7. Shkodinskii S.V., Rykova I.N., Yur'eva A.A. Opyt otdel'nykh zarubezhnykh stran v sfere snizheniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernyi vozdukh // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. - Seriya: Ekonomika. – 2021. - 4:118-132. doi:10.18384/2310-6646-2021-4-118-132 [In Russian].
8. Lyzhin D.N. Klimaticheskaya politika SShA: problemy i perspektivy global'nogo liderstva // Problemy natsional'noi strategii. – 2021. - 3(66). – P. 221-245. - doi:10.52311/2079-3359_2021_3_221 [In Russian].
9. Drugov Yu.S., Rodin A.A. Ekologicheskie analizy pri razli-vakh nefi i nefteproduktov. — Spb., 2000. - 273 p. [In Russian].
10. U.S. EPA (2010–2021). Exposure Assessment Tools by Chemical Classes – Hydrocarbons. EPA ExpoBox. (Summary of volatility of aliphatic hydrocarbons).
11. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Tsi bart A.S., Smirnova M.A. Ugle-vodorody v pochvakh: proiskhozhdenie, sostav, povedenie (obzor) // Pochvovedenie. - 2015. — No. 10. — P. 1195-1209. [In Russian]

12. Rashad A.M. et al. Monitoring organic pollutants from aliphatic hydrocarbons in soil samples within the shoreline in Gulf of Suez // Egypt. J. Petroleum. - 2024. - Vol. 33, No. 1. - Article 3.
13. MassDEP. Method for the Determination of Air-Phase Petroleum Hydrocarbons (APH). Massachusetts Dep. of Environ. Protection, Rev. 1. - 2009. - 54 p.
14. Hellén H. et al. C2-C10 hydrocarbon emissions from a boreal wetland and forest floor // Biogeosciences. - 2006. - Vol. 3, No. 2. - P. 167-174.
15. Lyman S.N., Mansfield M.L. Organic compound emissions from a landfarm used for oil and gas solid waste disposal // J. Air Waste Manage. Assoc. - 2018. - Vol. 68, No. 7. - P. 637-642.
16. Ausma S. et al. Volatile hydrocarbon emissions from a diesel fuel-contaminated soil bioremediation facility // J. Air & Waste Manage. Assoc. - 2002. - Vol. 52, No. 7. - P. 861-870.
17. Safarov A.M. et al. RU Patent 2519079C1: Method for express-detection of soil and groundwater pollution by oil and petroleum products. - 2014.
18. Rubin V.M., Il'kova I.I., Kremko L.M., Prisivotrov Yu.A., Samsonova A.S., Volod'ko I.K., Lukashev O.V. Gigienicheskoe obosnovanie normativov PDK nefteproduktov v pochvakh Respubliki Belarus // Gigiena i sanitariya. - 2013. - S. 99-101. [In Russian].
19. Zakon Respubliki Kazakhstan ot 11 marta 2002 goda № 302-II «Ob okhrane atmosfernogo vozdukh» [In Russian].
20. Metodicheskie rekomendatsii po gigienicheskomu obosnovaniyu PDK khimicheskikh veshchestv v pochve № 2609-82 [In Russian].

ТОПЫРАҚТАН АТМОСФЕРАЛЫҚ АУАҒА КӨШУ КЕЗІНДЕ АЛИФАТТЫ КӨМІРСУТЕКТЕР КОНЦЕНТРАЦИЯСЫНЫҢ ШЕКТІ МӘНДЕРІН АНЫҚТАУ

Эльмира Т. Ермолдина PhD, Ерлан А. Бекешев, Бибигуль М. Миркаримова* т.ғ.д., Бахытжан Ш. Бариева б.ғ.к., Елена Ю. Степанова, Аскар М. Муканов, Жансая К. Рымжанова

«Инфракос» РМК-ның Алматы қ. филиалы, Алматы, Қазақстан; ermoldina@mail.ru, chemist_e@mail.ru, bibigulm@mail.ru, barievabch@mail.ru, s.ell@mail.ru, askarmukanov85@gmail.com, Rymzhanova110@gmail.com

*Автор корреспонденции: Бибигуль М. Миркаримова, e-mail: bibigulm@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

зымыран-ғарыш қызметі,
шекті алифатты көмірсутектер,
мұнай көмірсутектері,
топырақтың табиғи түрі,
ылғал сыйымдылығы,
көші-қон,
микроклимат,
шектікке дейінгі концентрация,
ең аз концентрация

Мақала жайында:

Жіберілді: 26.03.2025
Қайта қаралды: 31.07.2025
Қабылданды: 25.08.2025
Жарияланды: 01.10.2025

АБСТРАКТ

Мақалада зиянды заттардың топырақтан атмосфералық ауаға көшу қабілетін көрсететін зияндылықтың заттардың ауа-миграциялық көрсеткіші бойынша шектікке дейінгі концентрацияны (ШДК) анықтау процесі қарастырылады. ШДК орнату адам денсаулығы мен экожүйеге қауіп-қатерді бағалаудағы маңызды қадам болып табылады, өйткені ол ластаушы заттардың қауіпсіз әсер ету деңгейін анықтауға көмектеседі. Жұмыста заманауи зерттеу әдістері талданады, сонымен қатар температура, ылғалдылық және топырақ құрамы сияқты заттардың көші-қонына әсер ететін факторлар ескеріледі. ШДК-ның практикалық қолданылуы ауаның ластануын азайту және халықтың денсаулығын қорғау стратегияларын әзірлеу аясында қарастырылады. Алынған эксперименттік мәліметтер негізінде атмосфералық ауа үшін шекті рұқсат етілген концентрацияға (ШРК) жақын шама таңдалды. Осыған байланысты топырақтағы 400 мг/кг-ға тең алифатты көмірсутектердің концентрациясы зерттелді. Бұл зерттеу мұндай концентрациялардың қоршаған ортаға және адам денсаулығына ықтимал әсерін бағалауға, сондай-ақ топырақ пен ауаның ластануымен байланысты ықтимал қауіптерді анықтауға мүмкіндік береді.

DETERMINATION OF THRESHOLD VALUES OF ALIPHATIC HYDROCARBON CONCENTRATIONS DURING THEIR MIGRATION FROM SOIL TO ATMOSPHERIC AIR

Elmira Ermoldina PhD, Yerlan Bekeshev, Bibigul Mirkarimova Doctor of Technical Sciences, Bakhytzhana Barieva Candidate of Biological Sciences, Yelena Stepanova, Mukanov Askar, Rymzhanova Zhansaya

Branch of RSE «Infrakos» in Almaty, Almaty, Kazakhstan; ermoldina@mail.ru, chemist_e@mail.ru, bibigulm@mail.ru, barievabch@mail.ru, s.ell@mail.ru, askarmukanov85@gmail.com, Rymzhanova110@gmail.com

* Corresponding author: Bibigul Mirkarimova, e-mail: bibigulm@mail.ru

KEY WORDS

rocket and space activity,
aliphatic limit hydrocarbons,
oil hydrocarbons,
natural soil type,
water capacity,
migration,
microclimate,
subthreshold concentration,
lowest concentration

About article:

Received: 26.03.2025

Revised: 31.07.2025

Accepted: 25.08.2025

Published: 01.10.2025

ABSTRACT

The article considers the process of determining the subthreshold concentration (STC) based on the air-migration hazard indicator, which reflects the ability of harmful substances to migrate from soil to atmospheric air. Establishing an STC is an important step in assessing risks to human health and ecosystems, as it helps determine safe levels of exposure to pollutants. The paper analyzes modern research methods and takes into account factors affecting the migration of substances, such as temperature, humidity and soil composition. The practical application of STC is considered in the context of developing strategies to reduce air pollution and protect public health. Based on the obtained experimental data, a value close to the maximum permissible concentration (MPC) for atmospheric air was selected. In this regard, the concentration of aliphatic hydrocarbons equal to 400 mg/kg in the soil was studied. This study allows us to assess the potential impact of such concentrations on the environment and human health, as well as identify possible risks associated with soil and air pollution.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).