УДК 669.712.1

**Экоотоксикологическая оценка влияния материала дорожных одежд
на загрязнение почвы придорожной полосы**

Шепелев И.И.¹, Потапова С.О.¹, Жижаев А.М.², Еськова Е.Н.¹

¹Красноярский ГАУ

²Институт химии и химической технологии СО РАН

Аннотация

*Показана экологическая безопасность применения нефелиновых шламов при строительстве нижних оснований дорожных одежд. С применением электронной микроскопии и химического анализа определена область влияния нефелинового шлама, применяемого при строительстве дорожных одежд, на почву придорожной полосы, которая ограничивается расстоянием 10 м. Проведены исследования по экотоксичности с использованием одно- и двудольных растений и почвенных инфузорий рода *Colpoda steinii*. результатами которых подтверждена возможность использования нефелиново-щебеночной смеси в дорожных одеждах.*

Ключевые слова: НЕФЕЛИНОВЫЙ ШЛАМ, ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ, ЭКОЛОГИЯ, ТОКСИЧНОСТЬ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Использование в дорожном строительстве отходов различных производств вместо исчерпаемых природных ресурсов (ПГС, гравий и т.п.) позволяет решить целый ряд природоохранных задач и даже улучшить качество создаваемых дорожных покрытий, что возможно за счет вяжущих свойств некоторых техногенных материалов. [1-3]. Доказано повышение трещиностойкости укрепленного грунта при строительстве дорожных оснований с использованием медленнотвердеющих вяжущих, получаемых на основе промышленных отходов [4-7]. В конце восьмидесятих годов прошлого столетия были попытки использования нефелинового шлама в строительстве дорог в Сибири, но

масштабного применения шлам и другие отходы глиноземного производства не имели [1, 8]. В последние годы объемы размещенного на шламовых картах АО «РУСАЛ Ачинск» нефелинового шлама превышают 6,5 млн. тонн в год, и его количество растет, что побуждает искать способы его вторичного использования или утилизации [9]. Однако же, при доказанном положительном влиянии шлама на качество дорожных одежд, на настоящий момент не проводилось исследований, которые доказывали бы отсутствие негативного влияния присутствия шлама в дорожных одеждах на прилегающие к дорогам территории.

Доказан тот факт, что удельная активность естественных радионуклидов, содержащихся в нефелиновом шламе, не превышает гигиенический норматив, установленный для отходов промышленного производства, используемых при изготовлении строительных материалов 1 класса, и равна 66,9 Бк/кг при нормативе 370 Бк/кг [10]. С применением рентгенофазового анализа был изучен минералогический состав нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск». Основным минералом размещаемого на шламохранилище нефелинового шлама в пробах составляет минерал ларнит-двухкальциевый силикат – $\square$ - $2\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ (более 80%). Установлено также наличие в нем алюмосиликатов натрия и кальция ($\text{Na}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$), соединений железа в виде ферритов и оксидов (CaFe_2O_4 , Fe_2O_3), кальцита (CaCO_3) и алюмината натрия ($\text{Na}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3$). До 5% в нефелиновом шламе находятся: кальций магниевые силикаты $\text{CaO} \times \text{MgO} \times \text{SiO}_2$, гидрогранаты кальция $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, кальциевые алюминаты $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ [10]. Наличие в нефелиновом шламе двухкальцевого силиката и гидросиликатов кальция подтверждает проведенный дифференциально-термический анализ.

Применение нефелинового шлама в дорожных одеждах в настоящее время осуществляется в виде нефелиново-щебеночной смеси, которую готовят на производственной площадке, потом ее укладывают в основание автодороги и укатывают катками [9, 10]. Для моделирования процесса формирования основания дорожных одежд были приготовлены опытные образцы в виде кубиков из нефелиново-щебеночной смеси.

Характерной особенностью земель с обследуемой территории в районе г. Сосновоборск является щелочная реакция почвы. Значение pH водной вытяжки с

различных проб, отобранных на расстоянии от автодороги на 5, 10, 50, 100 м, колеблется от 8,2 до 8,8 рН, что подтверждает повышенную щелочность почвы данного участка даже на большом удалении от автодороги. При этом значение рН для фоновой пробы (100 м от автодороги) тоже имело щелочную реакцию водной вытяжки почвы с данного участка (8,5 рН). Применение нефелинового шлама при реконструкции автодороги на участке в районе г. Сосновоборск не повлияло на изменение рН, так как даже в фоновой пробе значение рН имело щелочную реакцию, что обусловлено загрязнением почвы близлежащими промышленными объектами.

Морфометрические исследования почвенных образцов проводили с применением метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Минеральный состав и содержание элементов в высушенных пробах гумусно-минеральных агрегатов определяли с применением рентгенофазового и химического анализа.

На первом этапе полевых исследований были отобраны пробы почвенных образцов с придорожной полосы участка автодороги Красноярск-Сосновоборск, построенной с применением нефелинового шлама в основании дорожной одежды на удалении 10, 25 и 50 м от дорожной полосы. На снимках растровой электронной микроскопии хорошо видны гранулы размером 10-200 мкм, которые формируются при высушивании почвы. Гранулы представляют собой органоминеральные агломераты окатанной формы, в которых мелкие минеральные включения сцементированы гумусом.

Проведенные электронно-микроскопические исследования (рис. 1) почвенных образцов с территории, прилегающей к дорожному полотну, построенному с нижним слоем основания из нефелинового шлама, показали, что в почве на расстоянии 10 м отмечено присутствие минералов: кварца (точка 1), ларнита (точка 2) и рутила (точка 3).

Присутствие минерала ларнита (Ca_2SiO_4), который входит в состав нефелинового шлама, подтверждают результаты химического анализа пробы. Спектр (а) и гистограмма содержания (б) элементов в точке 2 приведены на рис. 2.

На удалении от дорожной полосы 25 м этих минералов не отмечено, при этом было идентифицировано наличие силикатных минералов – микроклина (KAlSi_3O_8) и кальцийсодержащих минералов – кальцита (CaCO_3) и анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (рис. 3, 4, 5).

TM3000_0315 2019-06-20 HL D5.4 x1.0k 100 um
obtained by FRC KSC SB of RAS

Рис. 1. СЭМ-изображение частиц образца почвы с придорожной полосы на расстоянии 10 м от дорожного полотна автодороги Красноярск – Сосновоборск, построенной с применением нефелинового шлама (гумусно-минеральная гранула)

Рис. 2. Спектр (а) и гистограмма содержания (б) элементов в точке 2 рис. 1. Идентифицировано присутствие минерала нефелинового шлама – ларнита (Ca_2SiO_4).

Рис. 3. СЭМ-изображение частиц образца почвы с придорожной полосы на расстоянии 25 м от дорожного полотна автодороги Красноярск – Сосновоборск, построенной с применением нефелинового шлама

Рис. 4. Спектр (а) и гистограмма содержания (б) элементов по области 1 рис. 3. Идентифицировано присутствие минералов анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) и микроклина (KAlSi_3O_8)

Рис. 5. Спектр (а) и гистограмма содержания (б) элементов по области 2 рис. 3. Идентифицировано наличие минералов кальцита (CaCO_3) и анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

На расстоянии 50 м от дорожного полотна отмечено наличие в почвенных образцах, кроме кальцита (CaCO_3) и силикатных минералов – микроклина (KAlSi_3O_8), присутствие еще одного минерала – силиката циркона (ZrSiO_4) (рис. 6 и 7).

Сравнительный анализ показал, что на расстоянии 25-50 м от дорожного полотна, построенного с нефелиновым шламом и без него, в почвенных образцах отмечено присутствие идентичных минералов. Поэтому можно считать, что влияние нефелинового шлама на почву, прилегающую к автомобильной дороге, минимальное, и пространственное его распространение ограничивается 10 м от дорожного полотна, что подтверждает химический анализ и отсутствие минерала ларнита в пробах почвы на удалении 25 м и 50 м.

Снимок электронной микроскопии гумусно-минеральной гранулы контрольного образца почвы с придорожной полосы на расстоянии 50 м от дорожного полотна автодороги Красноярск – Железногорск, построенного без использования нефелинового шлама, показал наличие в нем, в основном, силикатных минералов (кварца, алюмосиликатов кальция, натрия и калия).

Рис. 6. СЭМ-изображение частиц образца почвы с придорожной полосы на расстоянии 50 м от дорожного полотна автодороги Красноярск – Сосновоборск, построенной с применением нефелинового шлама (присыпка, проводящий скотч)

Рис. 7. Спектр (а) и гистограмма содержания (б) элементов минерала – силиката циркона ($ZrSiO_4$)

Содержание кальция в отобранном на расстоянии 50 м контрольном образце находилось на уровне 0,7%, что было намного меньше, чем в образце, отобранном на расстоянии 10 м от дорожного полотна, в котором оно находилось в пределах от 8,3 до 14 %. Это различие было обусловлено присутствием в дорожных одеждах щебня и других кальцийсодержащих соединений. Тяжелых металлов в данном образце не выявлено.

Снимок электронной микроскопии гумусно-минеральной гранулы контрольного образца почвы с придорожной полосы на расстоянии 50 м от дорожного полотна автодороги Красноярск – Железногорск, построенного без использования нефелинового шлама, показал наличие в нем, в основном, силикатных минералов (кварца, алюмосиликатов кальция, натрия и калия). Содержание кальция в отобранном на расстоянии 50 м контрольном образце находилось на уровне 0,7%, что было намного меньше, чем в образце, отобранном на расстоянии 10 м от дорожного полотна, в котором оно находилось в пределах от 8,3 до 14 %. Это различие было обусловлено присутствием в дорожных одеждах щебня и других кальцийсодержащих соединений. Тяжелых металлов в данном образце не выявлено.

Для подтверждения отсутствия токсичного действия нефелинового шлама были проведены дополнительные экоотоксикологические исследования. В качестве биоиндикаторов при определении токсичности почвогрунта и техногенных материалов, применяемых в дорожном строительстве, были взяты инфузории *Colpoda steinii*. Инфузории, являясь одноклеточными микроскопическими организмами, в силу своих размеров поглощают, в основном, растворенные вещества. Это делает их ценными тест-объектами для первичного экспресс-определения острой токсичности техногенных материалов и грунтов на их основе. Данная методика предусматривала экстракцию водой или ацетоном образца почвы, загрязненного техногенными материалами, последующее фильтрование полученного раствора и оценку токсичности образца по тест-реакции инфузорий. Токсичность почвенного образца определяли по выживаемости инфузорий за 1 час для анализа водного раствора 1% ацетонового экстракта и 3 часа для анализа водного экстракта почвы по формуле:

$$T = (Q_{об} - Q_{ж}) / Q_{об} \times 100\%,$$

где: $Q_{об}$ – общее начальное количество инфузорий, штук;

$Q_{ж}$ – количество выживших инфузорий по окончании опыта, штук.

При этом анализируемые материалы по токсичности относили к практически нетоксичным (токсичность в пределах 20%), малотоксичным (токсичность в пределах 21-40 %), умеренно токсичным (токсичность в пределах 41-60 %), опасно-токсичным (токсичность в пределах 61-80 %), высокоопасно-токсичным (токсичность в пределах 81-100 %).

В качестве объекта изучения техногенного загрязнения почвы была взята автодорога Красноярск-Сосновоборск, построенная с применением нефелинового шлама. Почвенные образцы для определения токсичности отбирали на различном удалении от дорожного полотна: 10, 25, 50 м. Токсичность проб почвогрунта (в %) определяли по вышеприведенной формуле и затем каждой пробе устанавливали категорию токсичности.

Результаты экотоксикологических исследований почвы с применением инфузории *Colpoda steinii* показали, что на удалении от автодорожного полотна на 10 м проба почвы считается умеренно токсичной, на удалении 25 и 50 м – нетоксичной. В ходе проведения эксперимента было установлено, что ни один из испытуемых почвенных образцов, отобранных на удалении 25 и 50 м, не являлся токсичным для почвенных инфузорий и даже через три часа водной вытяжки во всех опытных образцах тест-объекты выжили.

Точность определения токсичности почвогрунта подтверждают дополнительно проведенные опыты другим способом биотестирования по тест-культурам в соответствии с «Методикой выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязненных почв». В качестве тест-культур в этом случае использовались пшеница мягкая яровая (*Triticum vulgare* L.), сорт Новосибирская 29 и кресс-салат (*Lepidium sativum*), сорт Донской.

В таблице 1 приведена экотоксикологическая оценка образцов почвы по таким тест-функциям, как всхожесть семян и длина корней тест-растений. Сделано следующее заключение о токсичности проб. К группе «умеренно токсичные» отнесена почва, взятая на расстоянии 10 м от автодороги, дорожная одежда которой выполнена с применением нефелинового шлама. Угнетающее действие на обе тест-функции у растений составило в среднем 53,6% для проб, отобранных в 10 м от дорожного полотна в районе г. Сосновоборск. На расстоянии 50 м и более от автотрассы почвенный покров признан относящимся к «нетоксичным» по результатам, полученным на обоих видах тест-растений.

Таблица 1. Экотоксикологическая оценка почвенного покрова по снижению всхожести семян и угнетению роста корней тест-растений (район исследований г. Сосновоборск)

Расстояние от дорожного полотна, м	Разница с контролем по всхожести, %			Разница с контролем по длине корня, %			Среднее по двум тест-функциям, %	Заключение о токсичности проб
	кресс-салат	пшеница	среднее по тест-культурам	кресс-салат	пшеница	среднее по тест-культурам		
10	55,1	60,5	57,8	55,0	43,6	49,3	53,6	умеренная токсичность
50	10,5	8,0	9,3	12,2	8,3	10,3	9,8	не токсично
100	-1,9	0,8	-0,6	4,2	5,4	4,8	2,1	не токсично

Проведенные опыты с данными тест-культурами показали полную идентичность полученных результатов по токсичности с инфузориями *Colpoda steinii*.

Заключение

Выполненные исследования по оценке влияния нефелинового шлама были подтверждены на практике в процессе опытно-полевых работ на различных участках автодорог, построенных с использованием данного шлама. Изменение содержания в почве придорожной полосы кальция как основного элемента, присутствующего в шламе, имело аналогичный характер на расстоянии автодороги от 10 до 100 м на всех анализируемых участках автодороги с основанием, построенным с нефелиновым шламом и без шлама. Содержание обменного Al в почве анализируемых образцов – менее 0,5 мг/кг. Это очень низкий показатель, очевидно, не являющийся следствием присутствия шлама в составе смесей для дорожного строительства. В образце почвы, отобранном на придорожной полосе автодороги, построенной с применением нефелинового шлама, видно, что высушенные гранулы представляют собой органоминеральные агломераты неправильной слабоокатанной формы, в которых мелкие минеральные включения сцементированы гумусом. Минеральная часть в них, в основном, представлена кварцем (SiO_2) и плагиоклазами. В отличие от контрольного образца, в почвенных образцах, отобранных вдоль дороги, построенной с применением нефелинового шлама, на удалении до 10 м присутствуют частицы ларнита (Ca_2SiO_4), основного минерала шлама. На удалении 25-50 м от полотна автодороги частиц в почве минерала ларнита не отмечено, в ней, по данным локального химического анализа, присутствуют, в основном, силикатные минералы и

кальцит. Проведенными исследованиями почвогрунта, отобранного на различном удалении от придорожной полосы, доказано отсутствие токсичности в анализируемых пробах почвы. На основании проведенных исследований по экотоксичности с использованием одно- и двудольных растений и почвенных инфузорий рода *Colpoda* установлена возможность использования нефелинового шлама в качестве компонента дорожной одежды в виде нефелиново-щебеночной смеси. При этом необходимо учитывать, что в стесненных условиях при укатке основания дорожной одежды происходит быстрая гидратация нефелинового шлама, и он переходит в монолитное состояние, сходное с бетоном [2, 3].

Проведенные исследования показали экологическую безопасность применения нефелиновых шламов при строительстве нижних оснований дорожных одежд. Широкое использование нетоксичных техногенных материалов глиноземного производства в дорожно-строительных технологиях позволяет решить проблему ресурсосбережения природных строительных материалов и снизить воздействие на окружающую природную среду производственных отходов в местах их размещения.

Список использованных источников

1. Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. – М.: Транспорт, 1971. – 246 с.
2. Бердов Г.И. Перспективные направления совершенствования составов и технологии строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ / Г.И. Бердов, Н.А. Машкин // Известия вузов. Строительство. – 2015. – №4. – С. 45-56.
3. Столбоушкин А.Ю. Ресурсосберегающая комплексная переработка минерального техногенного сырья в производстве строительных материалов / А.Ю. Столбоушкин, Г.И. Бердов // Известия вузов. Строительство. – 2011. – №1. – С. 46-53.
4. Юдина Л.В. Активированные золошлаковые смеси в основаниях дорожных одежд / Л.В. Юдина, В.В. Турчин, П.П. Геденов // Экология и ресурсосбережение. – Ижевск: ИжГТУ. – 1995. – Вып. №2. – С. 9-24.
5. Тарнаруцкий Г.М. Вяжущие на основе шлаков доменного ферромарганца для дорожного строительства / Г.М. Тарнаруцкий, Л.М. Хромова, Н.П. Ботнарева, А.С. Пополов // Тр.СоюздорНИИ. – М. – 1979. – Вып. №24. – С. 63-67.
6. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. Техногенные грунты: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 250 с.
7. Бескровный В.М. Использование нефелинового шлама для устройства оснований дорог / В.М. Бескровный, Н.С. Дежина // Автомобильные дороги. – 1980. – №5. – С. 23-25.

8. Shepelev I.I. Ecological engineering in the construction and exploitation of roads with technogenic materials / I.I. Shepelev, E.N. Eskova, S.O. Potapova, A.M. Nemerov and N.N. Bochkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2019. – 537 (6). – 062-067.

9. Шепелев И.И. Технология получения комплексного неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства / И.И. Шепелев, Н.Н. Бочков, А.Ю. Сахачев // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2015. – Том 58. – Вып. 3. – С. 77-81.

10. Шепелев И.И. Дорожные твердеющие смеси на нефелиновых вяжущих с гипсоангидритовыми модифицирующими добавками / И.И. Шепелев, А.И. Кудяков, Н.Н. Бочков, А.М. Жижаев // Вестник ТГАСУ. – 2017. – №1. – С. 181-189.

=====

Цитирование:

Шепелев И.И., Потапова С.О., Жижаев А.М., Еськова Е.Н. Экоотоксикологическая оценка влияния материала дорожных одежд на загрязнение почвы придорожной полосы [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_507.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215507>.