

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЗОТНОГО РЕЖИМА ПОЧВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

© 2025 г. А. О. Герасимов^{1,*}, Ю. М. Поляк¹, Л. Г. Бакина¹

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН –
Федеральный исследовательский центр РАН
197110 Санкт-Петербург, Корпусная ул., 18, Россия
*E-mail: recchi@rambler.ru

Рассмотрены результаты исследований азотного режима загрязненных нефтью почв за последние годы. Подчеркнута недостаточная изученность данного вопроса для техногенных почв, несмотря на то что загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами может вызвать значительные изменения в круговороте азота и привести к необратимым нарушениям экологических функций почв. Обобщение результатов исследований позволило выявить наиболее информативные показатели для оценки процессов азотного режима и экологического состояния нефтеагрязненных почв. В условиях нефтяного загрязнения в почве возрастает соотношение содержания углерода и азота, снижается нитрифицирующая активность почв, относительно увеличивается доля аммонийных форм азота. Показано, что нарушения процессов азотного цикла, содержания и соотношения содержаний разных форм азота, характеризующих определенные стадии его превращения в почве, могут восстанавливаться в различной степени при рекультивации в зависимости от свойств почвы. В настоящий момент наиболее перспективными направлениями исследований процессов азотного цикла в нефтеагрязненных почвах являются: изучение жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, осуществляющих различные стадии процессов азотного цикла, взаимосвязи структуры и разнообразия микробиоты со скоростью процессов биодеструкции нефти и трансформации азотных соединений в загрязненных почвах. Изучение процессов азотного цикла имеет важное значение для оценки последствий загрязнения почв нефтепродуктами и выбора наиболее эффективных стратегий их восстановления.

Ключевые слова: нитратный азот, аммонийный азот, рекультивация, микроорганизмы, нефтеагрязнение, почвы.

DOI: 10.31857/S0002188125010084, **EDN:** VCJRCA

ВВЕДЕНИЕ

Азот – это важнейший компонент почвы, от которого зависит стабильность и функционирование почвенных экосистем. Общие запасы азота в земной коре исчисляются десятками миллиардов тонн.

В пахотном слое разных почв количество азота меняется в широких пределах: в дерново-подзолистых, песчаных и супесчаных почвах – 0,04–0,08, в суглинистых и глинистых – 0,1–0,15%. Наиболее богаты общим азотом серые лесные и черноземные почвы, где его количество достигает 0,3–0,5% и больше [1–3].

Круговорот азота является одним из наиболее важных круговоротов веществ, происходящих в природе, большая часть его цикла происходит с участием биосфера и напрямую связана с почвой [4, 5].

Азот в почвах находится преимущественно в недоступной растениям органической форме, доля минерального азота составляет всего около 1% от общего [6]. Между тем доступность азота является основным фактором, определяющим рост и продуктивность растений [7, 8]. Под влиянием непрерывных биологических процессов органический азот частично переходит в доступные растениям минеральные формы – в нитрат-ионы NO_3^- , нитрит-ионы NO_2^- и ионы аммония NH_4^+ [9].

Основу превращений азота составляют процессы минерализации и иммобилизации. При минерализации органический азот превращается в минеральный посредством аммонификации и нитрификации. Начальным процессом минерализации органических соединений является аммонификация – осуществляемый микроорганизмами распад азотсодержащих органических соединений почвы до аммонийного

азота, органических кислот, углекислого газа [10]. Ежегодно в процессе аммонификации высвобождается до 2% азота от общих запасов азотсодержащих органических соединений [11]. В анаэробных условиях аммонийный азот может усваиваться растениями, а в аэробных происходит процесс нитрификации, когда он под влиянием микроорганизмов переходит в нитриты и затем окисляется до нитратов. Таким образом, в почве формируются усваиваемые растениями минеральные формы азота: аммонийная, нитритная, нитратная [12, 13].

Максимальное количество обменного аммония в почвах отмечают весной, затем оно снижается летом и вновь возрастает осенью. Кроме того, объемы обменного аммония возрастают при избыточном и недостаточном увлажнении, а также при холодной погоде. Растения, предпочитающие почвы с высоким уровнем рН, лучше усваивают нитратный азот, а растения кислых почв – аммонийный. Растения способны усваивать до 80% запасов аммонийного азота [14]. Пик нитрификации приходится на первую половину вегетации. Накопление нитратной формы минерального азота определяется потенциальными запасами почвенного плодородия и возрастает с повышением содержания гумуса и общего азота [6, 13].

В зависимости от соотношения С : N в субстрате, может происходить либо накопление аммонийного азота в почве, либо потребление высвобождающегося аммония микроорганизмами – процесс иммобилизации азота [15]. При иммобилизации минеральные соединения азота вновь переходят в органические, не усвояемые растениями. Кроме того, содержание минерального азота в почве уменьшается в результате денитрификации, развивающейся в анаэробных условиях. В процессе денитрификации нитратный азот восстанавливается микроорганизмами до различных газообразных соединений, которые теряются из почвы. Потери азота могут также происходить при значительном выносе аммонийного и нитратного азота урожаем культур и при вымывании азота в составе почвенного раствора [15, 16].

На поглощение корнями растений аммонийных или нитратных ионов влияет аэрация и величина рН окружающего раствора. Нитраты легко абсорбируются корнями, а для поглощения аммония необходим контакт корневого волоска с почвенно-поглощающим комплексом [13].

Весь цикл происходящих в почве превращений азота, в том числе минерализация (преобразование органического азота в неорганический), азотфиксация (преобразование неорганического азота в органический), нитрификация (преобразование NH_4^+ в NO_3^-) и денитрификация (преобразование NO_3^- в N_2), осуществляется благодаря деятельности почвенных микроорганизмов [17, 18]. Преобразование

азота играет ключевую роль в продуктивности и устойчивости почвенных экосистем [19, 20].

Загрязнение почвы различными поллютантами, в том числе нефтью и нефтепродуктами, может вызвать непредсказуемые изменения в круговороте азота и привести к необратимым нарушениям экологического баланса, что является потенциально серьезной экологической проблемой [21–23]. В общих случаях участвующие в круговороте азота микроорганизмы (аммонофицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, азотфиксирующие) под влиянием нефтяного загрязнения в небольших дозах получают стимул к развитию вследствие внесения в почву свежего органического материала. Однако высокие дозы нефтепродуктов угнетают нитрифицирующие бактерии, численность которых не восстанавливается до фонового уровня и через 10 лет после загрязнения [24].

Необходимость более полного понимания поведения азота в условиях нефтяного загрязнения обуславливает актуальность исследований.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА В ПОЧВЕ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Необходимо отметить, что научных исследований, посвященных изучению воздействия нефтью и нефтепродуктами на содержание азота и азотный режим почв, сравнительно немного. Пути превращения азота в нефтезагрязненных почвах систематически не изучали, количественное определение коэффициентов трансформации азота не проводили [25]. Тем не менее, изучением влияния нефти и различных видов нефтепродуктов на азотный режим почв занимаются ученые ряда стран. Основная часть работ по данной тематике выполнена российскими, нигерийскими, польскими и – в меньшей степени – индийскими и китайскими исследователями.

Нефть является практически безазотистым веществом, поэтому ее попадание в почву способно привести к изменению содержания общего азота вследствие нарушения биологических процессов азотного цикла. Влияние нефтепродуктов на содержание общего азота проявляется в различных почвах по-разному.

Увеличение содержания общего азота в супесчаных почвах было отмечено при 10% и 20%-ном загрязнении их отработанным моторным маслом – до 29.2 и 31.5% от контроля соответственно [26]. Нефтяное загрязнение в дозах 5–50 мл/кг почвы повышало содержание общего азота и органического углерода в почве параллельно увеличению дозы нефти [27]. Увеличение показателей содержания

общего азота в загрязненной сырой нефтью почве почти в 2 раза по сравнению с фоном связывали с фиксацией атмосферного азота микроорганизмами, ассимилировавшими углеводороды.

В ряде исследований количество общего азота в результате нефтезагрязнения, напротив, снижалось. Показано, что загрязнение сырой нефтью уменьшало содержание общего азота через 2 нед после загрязнения в окрестностях нигерийского Порт-Харкорта [28], и даже очень небольшое количество нефти (менее 2% масс.) в зоне нефтеразлива снижало содержание доступного азота в почве [29]. Через 2 нед после загрязнения дизельным топливом в объемах от 1.4 – 5% в почве дельты р. Нигер уменьшилось общее содержание азота и основных катионов. Причем снижение происходило по мере увеличения концентрации поллютанта. Причиной могло стать преобразование микроорганизмами минеральных форм азота в почве в органические. Загрязнение почвы дизельным топливом в дозах 5–15 мл/кг снижало содержание общего азота в надземной части овса *Avena sativa* L. на 30%. Причиной этого стало увеличение численности почвенных микроорганизмов (интенсификация развития денитрифицирующих бактерий с одновременным угнетением нитрификаторов), которые поглощали значительное количество азота, тем самым снижая его доступность для растений [30].

Диагностическая роль соотношения С : N отмечена в литературе при оценке азотного режима нефтезагрязненных почв. Загрязнение почв нефтью – безазотистым веществом – как правило, приводит к увеличению этого показателя. Например, соотношение С : N увеличилось во всех вариантах, достигнув 114.3 на участке с максимальным уровнем загрязнения (5%), что, вероятно, зависело от активности микроорганизмов [30, 31]. Высокое соотношение С : N, приводящее к иммобилизации почвенных нитратов, в сочетании с нефтезагрязнением, по мнению авторов, объясняет низкий уровень содержания нитратного азота в загрязненной почве [32]. После загрязнения товарной нефтью серой лесной почвы Предкамья количество общего азота в ней не изменилось, но снизилось содержание подвижных форм азота (оно было чуть больше контроля, что было обусловлено обволакиванием почвенных частиц нефтяной пленкой, затрудняющей переход питательных элементов в почвенный раствор) и расширилось соотношение между азотом и углеродом с 1 : 13 в контроле до 1 : 17.5 в сильно загрязненной почве (40 л/м²). Эти изменения агрохимических свойств, вызванные высокими дозами нефти, сохранились и через 10 лет [33]. Загрязнение сырой нефтью в дозах от 0.35 до 50 г/кг изменяло содержание минерального азота в заболоченных почвах и соотношение С : N, а также приводило к иммобилизации доступного азота почвенными микроорганизмами, что значительно снижало

возможность поглощения его растениями. Одновременно увеличивалось накопление азота в микробной биомассе почвы [34].

Загрязнение почв нефтью в первую очередь отражается на подвижных, биодоступных формах азота, которые непосредственно связаны с функционированием микробоценоза и определяют экологическую устойчивость экосистем [35]. Нефтепродукты в почве вызывают снижение биодоступных форм азота и других элементов [30].

Изучение литературных источников позволило выявить общие тенденции: токсическое действие углеводородов изменяет физико-химические свойства почвы, способствует возрастанию соотношения углерода к азоту и фосфору, вызывает ухудшение азотного режима, снижение нитрифицирующей активности почв и увеличение доли аммонийных форм азота. Уменьшение концентрации нитратного азота и возрастание содержания аммонийного азота происходит вследствие нарушения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов. Кроме того, часто наблюдают переизбыток содержания углерода на фоне недостатка азота и фосфора (С : N : Р = 100 : 5 : 1).

С увеличением концентрации нефти при ее внесении в светло-каштановую почву Калмыкии в дозах 2.5, 5 и 10% от массы почвы содержание аммонийного азота на загрязненных участках возрастало (с 44.2 в контроле до 66.4, 84.5 и 91.3 мг/кг соответственно), нитратного азота – уменьшалось (с 123 в контроле до 113, 88.4 и 78.2 мг/кг соответственно). Общее содержание азота варьировало в пределах 1620–2440 мг/кг. Также значительно увеличивалось соотношение органического углерода к общему азоту [36]. Нефтяное загрязнение пахотного слоя серой лесной почвы в объеме 2 т/га снизило содержание нитратного азота с 6.5 до 3.8 мг/кг, легкогидролизуемого азота – на порядок, с 41 до 3.8 мг/кг. Количество аммонийного, трудно- и негидролизуемого азота, напротив, существенно возросло. При этом содержание валового азота не изменилось [35].

Также отрицательно влияло на процесс нитрификации и содержание азота загрязнение дизельным топливом и бензином бурой почвы, где было зафиксировано повышенное содержание аммонийного азота и пониженное – нитратного. Загрязняющие вещества ингибирировали нитрификацию в следующем порядке: дизельное топливо > дизельное топливо + рапсовое масло > рапсовое масло > бензин + этанол > бензин. Спустя 1.5 мес. после загрязнения добавление рапсового масла в дизельное топливо и этанола в бензин снижало уровень содержания аммонийного азота в почве на 88–99% [37].

Отмечено значительное воздействие нефти в дозах 10 и 20 г/кг на содержание нитратного азота в черноземе выщелоченном и темно-серой лесной почве. В варианте с внесением нефти под культуру сорго

нитратный азот в верхнем горизонте практически отсутствовал (до 1.9 мг/100 г почвы) вследствие резкого угнетения активности нитрификаторов нефтью, а также поглощения его растениями. В контроле количество нитратного азота уменьшалось к осени с 22.5 до 6.8 мг/100 г почвы. Внесение нефти в чернозем способствовало повышению содержания нитратного азота, но через несколько лет нитрификационная способность чернозема тоже угнеталась. Содержание нитратного азота в черноземе и луговой почве достоверно уменьшалось за 3 года при возделывании всех культур – райграса и клевера, овсяницы и ежи [38].

Отрицательное влияние нефтепродуктов на процесс нитрификации и высокая чувствительность нитрифицирующих бактерий к загрязнению почвы сырой нефтью установлены также рядом зарубежных исследователей [39, 40]. Загрязнение почвы бензином и дизельным топливом значительно увеличивало содержание аммонийного азота в ущерб уровню нитратного азота [41]. Это явление объяснялось изменениями в жизнедеятельности микробиоты. Увеличение количества аммонийного азота в нефтезагрязненной почве связывали прежде всего с повышением численности аммонифицирующих микроорганизмов, которым компенсировалось ингибирование углеводородами активности почвенной протеазы. Это приводило к нарушению почвенного гомеостаза и развитию токсикоза почв. Как следствие, угнетался рост растений, нарушались функции фотосинтеза и дыхания [42, 43].

Анализ современного состояния данной проблемы показал, что, несмотря на выявленные нарушения азотного режима, вызванные загрязнением почв нефтью и нефтепродуктами, возможность прогнозирования данных воздействий пока ограничена [44, 45]. Исследования изменений азотного режима почв, вызванных нефтезагрязнением, в естественных условиях ограничены высокой изменчивостью внешней среды, разнообразием почвенной микробиоты и взаимодействием между этими факторами [22]. Данные о круговороте азота в почвах, загрязненных нефтью, очень немногочисленны [45].

Комплексность проблемы изучения азотного режима нефтезагрязненных почв определяется тем фактом, что биологические процессы азотного цикла сами по себе являются очень сложными, разнонаправленными, комплексными и зависящими от условий окружающей среды как непосредственно, так и опосредованно, через нарушения состава и функционирования комплекса почвенных микроорганизмов. Сбалансированность процессов превращения азота естественным образом складывается как результатирующая этих процессов, определяет общее экологическое состояние почвы и восстановление нормального функционирования биогеоценоза после

разлива нефти. Вследствие этого изучение процессов азотного цикла в нефтезагрязненных почвах требует разносторонних комплексных исследований, затрачивающих по возможности все необходимые аспекты процессов его трансформации.

ВЛИЯНИЕ РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА АЗОТНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ

Выбор методов рекультивации нефтезагрязненных почв должен базироваться на технологиях, которые максимально эффективно восстанавливали бы биологические процессы превращения азота в почвах, во многом определяющие здоровье почвы и нормальное выполнение ею экологических функций.

Азотный режим имеет ведущее значение для восстановления плодородия нефтезагрязненных почв [46]. Сведения о воздействии рекультивационных мероприятий на азотный режим нефтезагрязненных почв в научной литературе немногочисленны и зачастую противоречивы. Очевидно, что по прошествии некоторого времени первоначальные условия, сложившиеся в почве после попадания в нее нефти, меняются. Содержание и соотношение разных форм азота, характеризующих определенные стадии его превращения в почве, меняются. Это происходит по мере включения механизмов самоочищения почвы, а также после внесения в загрязненную почву удобрений и биопрепараторов во время рекультивации. Трансформация показателей азотного режима имеет важное значение при оценке последствий загрязнения почв нефтепродуктами [43].

Обычно по мере снижения содержания нефтяных углеводородов вследствие испарения и минерализации усиливаются процессы нитрификации. Количество аммонийного азота постепенно сокращается, а нитратного – возрастает [40, 47].

Внесение компоста, бентонита и СаО нейтрализовывало влияние бензина и дизельного топлива и изменяло содержание аммонийного и нитратного азота в почве после уборки урожая. Бентонит в дозе 5 см³/кг и оксид кальция способствовали увеличению содержания нитратного азота в 4 раза и снижению содержания аммонийного азота (на 11%) в загрязненной бензином почве после уборки ярового ячменя. Бентонит и компост снижали объемы аммонийного азота (на 42 и 35% соответственно) и увеличивали содержание нитратного азота в почве при загрязнении дизельным топливом (2.5 см³/кг) [41].

Применение удобрения диаммонийфосфата увеличило содержание нитратного азота в загрязненной нефтью почве в 1.1–1.3 раза при дозах нефти 5 и 10% соответственно. Диаммонийфосфат подавлял денитрификацию, в результате чего азот накапливался в почве. Напротив, препараты Гумат, Урожай-С, ЭкоАрганика стимулировали рост микробиоты, которая

участвовала в процессе денитрификации и снижала содержание нитратного азота в почве по сравнению с контролем в среднем в 1.5–3.3 раза. В загрязненном образце, не обработанном препаратами, при объеме нефти 20% содержание нитратного азота повысилось в 2.3 раза [48].

Внесение перегноя в виде органических и минеральных удобрений для восстановления нефтезагрязненной (2 т/га) серой лесной почвы на 2-й год активизировало микробиологические процессы нитрификации. Они привели к повышенному накоплению нитратного азота и биомассы растений, хотя в первый год количество нитратного азота оставалось низким. Минеральные удобрения способствовали восстановлению количества азота в почве, но изменения произошли только в содержании трудно- и негидролизуемой форм азота. За 4 года эксперимента количество аммонийного азота выросло с 1.7 до 2.2 мг/кг, внесение N60P60K60 привело к его уменьшению с 1.9 до 1.4 мг/кг, а сочетание N60P60K60 с органическим удобрением повысило содержание азота с 2.4 до 2.6 мг/кг. Количество нитратного азота выросло на фоне загрязнения нефтью с 3.8 до 8.6 мг/кг, а при внесении N60P60K60 и органических удобрений – с 5.3 до 13.4 мг/кг соответственно [35].

Содержание общего азота в загрязненных почвах со временем также восстанавливалось. Внесение осадка сточных вод (активного ила) оказывало восстанавливающее действие на почвы, загрязненные дизельным топливом, в которых увеличилось содержание общего азота [30].

Обработка загрязненных сырой нефтью суглинистых песков сельхозугодий обезжирающими и моющими средствами способствовала увеличению содержания в почве элементов почвенного плодородия – общего азота, углерода и доступного фосфора на 33–103% за счет бактериальной биодеградации нефти. Это биоразложение увеличило фиксацию атмосферного азота. После рекультивации количество азота в почве полностью восстановилось [49].

Во время ремедиации загрязненных дизельным топливом почв в дельте р. Нигер соотношение С : N значительно снизилось, особенно в вариантах с высокими дозами загрязнения. Причиной этого снижения стало сопутствующее увеличение содержания общего азота в почве (на 50–80%) по сравнению с первыми неделями после загрязнения [31].

Вместе с тем, в связи с изменчивостью химических и физических свойств почвы, а также почвенных микробных сообществ, данные, полученные в краткосрочных экспериментах, зачастую противоречивы, особенно при сравнении результатов лабораторных и полевых опытов [21]. Лабораторные исследования, как правило, продолжаются не дольше нескольких недель, а иногда и суток, в то время как в природных условиях процесс биодеструкции нефти в почве

может занимать годы и даже десятилетия [50, 51]. Поэтому для лучшего понимания изменений, происходящих в азотном цикле под влиянием нефти, выявления долгосрочных последствий загрязнения и оценки эффективности восстановления азотного режима почвы, желательно и даже необходимо проведение многолетних полевых экспериментов.

ВОЗМОЖНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ АЗОТА В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ

Несмотря на наличие упомянутых работ, в настоящее время большинство исследований азотного режима почв по-прежнему преимущественно касается использования азотных удобрений [52–55].

Весьма перспективным представляется изучение роли микроорганизмов в процессах превращения азота в нефтезагрязненных почвах, которая пока фактически не освещена. Малочисленны и спорадичны данные об изменениях видового состава микроорганизмов, осуществляющих различные стадии процессов азотного цикла в нефтезагрязненных почвах [56]. Нет информации о взаимосвязи структуры и разнообразия почвенных микроорганизмов, осуществляющих процессы превращения азота, со скоростью процессов биодеструкции нефти и трансформации азотных соединений в нефтезагрязненных почвах [25].

Столь же малочисленны данные о составе и функциональной активности почвенных микроорганизмов [45]. Известно, что микробная сукцессия с активным развитием микроорганизмов, устойчивых к нефтяным углеводородам и/или способных к их деградации, происходит достаточно быстро [57]. Значительно больше времени требуется микроорганизмам для адаптации метаболизма к углеводородам нефти. Адаптационные процессы, включающие динамику популяций, существование видов и генетическую изменчивость, обычно ускоряют естественную деградацию углеводородов [58]. Поддержание гомеостаза зависит от видового состава микробиоты, круговорота азота и механизмов микробного метаболизма в загрязненной нефтью почве. В условиях загрязнения метаболическая активность микробиоты определяется множественными взаимодействиями (положительными, отрицательными и нейтральными), реакцией на изменение скорости роста и выживаемостью [59]. Кроме того, благодаря негативным взаимодействиям происходит регуляция плотности микробных популяций [22]. В данный момент не известно, будут ли изменения, происходящие в нефтезагрязненных почвах в процессе их восстановления, направлены на формирование тех

микробных сообществ, которые способствовали бы наиболее полному использованию соединений азота и максимальной скорости реакций азотного цикла.

Отклик почвенной микробиоты, участвующей в круговороте азота, на загрязнение нефтью во многом зависит от факторов среды [56, 60]. Нефть, одновременно как источник углерода и как токсичное соединение, может заметно влиять на микробиологические процессы трансформации азота. Это предопределяет необходимость изучения метаболизма азота при загрязнении почвы в зависимости от концентраций нефти. Важными задачами в этом случае будут изучение влияния нефти на общие показатели преобразования азота в почве, сравнение отклика процессов трансформации азота на загрязнение различными концентрациями нефти – низкими, средними и высокими, выявление механизмов круговорота азота, осуществляемых микроорганизмами различных функциональных групп, особенностей восстановления и сохранения биоразнообразия почвенной микробиоты азотного цикла в нефтезагрязненных экосистемах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществляемые почвенной микробиотой биологические процессы преобразования азота играют ключевую роль в продуктивности и устойчивости почвенных экосистем. Изучение процессов азотного режима почв необходимо для более полного понимания поведения азота в условиях нефтяного загрязнения и механизмов восстановления нефтезагрязненных почв. На сегодняшний момент проблему изучают, но имеющиеся публикации по данной тематике представляют собой достаточно разрозненный материал, и проведенных исследований пока недостаточно, чтобы составить о проблеме комплексное представление.

Тем не менее, имеющиеся публикации позволяют сделать предварительные выводы о том, что попадающие в почву нефтепродукты изменяют содержание общего азота, влияют на баланс аммонийной и нитратных форм азота, а также на соотношение С : N, важное в диагностическом плане. Изучение влияния различных рекультивационных мероприятий на азотный режим нефтезагрязненных почв показало, что внесение различных удобрений обычно способствует эффекту восстановления, накоплению нитратного азота в почве и в целом улучшает почвенное плодородие.

Перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение роли микроорганизмов в процессах превращения азота в нефтезагрязненных почвах, что может способствовать разработке новых методов рекультивации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузина В.Д., Антонова И.Н., Наполова Г.В., Наполов В.В. Динамика легкогидролизуемого азота под ячменем // Использование генетических ресурсов сельскохозяйственных растений в современном земледелии: сб. научн.-практ. конф. молод. ученых. Орел: Орел ГАУ, 2012. С. 265–266.
2. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Азот в агросистеме на черноземных почвах. М.: РАН, 2018. 180 с.
3. Чекин Г.В., Смольский Е.В. Агрохимические свойства почв опытного поля Брянского ГАУ // Вестн. Брянск. ГСХА. 2022. С. 31–37.
4. Nutrient cycling in terrestrial ecosystems / Eds. P. Marschner, Z. Rengel. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 397 p.
5. Филиппова Л.С. Круговорот азота и его соединений в почве // Международ. научн.-исслед. журн. 2023. № 8(134). С. 5.
6. Рагимов И.И. Содержание и формы азота в почве // Школа науки. 2021. № 5(42). С. 58–59.
7. Lawlor D.W., Lemaire G., Gastal F. Nitrogen, plant growth and crop yield // Plant Nitrogen / Eds. Lea P.J., Morot-Gaudry J.F. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. P. 369–378.
8. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
9. Hofman G., Van Cleemput O. Soil and plant nitrogen. Paris, France, September 2004. International Fertilizer Industry Association, 48 p.
10. Ляминка Ю.Б., Хворова Л.А. Моделирование динамики азота в почве (теоретические аспекты) // Изв. АлтайГУ. 2011. № 1–2(69). С. 94–97.
11. Васильченко Н.И. Агрогенная трансформация азота в почвах северного Казахстана // Вестн. АлтайГАУ. 2014. № 6. С. 67–71.
12. Hachiya T., Sakakibara H. Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and signaling in plants // J. Exp. Bot. 2017. V. 68. Iss. 10. P. 2501–2512.
13. Таракановский А. Минеральный азот в почве. URL: <https://direct.farm/post/mineralnyy-azot-v-pochve-17471> (дата обращения: 27.04.2023).
14. Попова Е.Н., Семенов С.М. Влияние антропогенного азота на продуктивность сельскохозяйственных растений // Пробл. экол. мониторинга и моделирования экосистем. 2003. Т. 19. С. 180–199.
15. Heil J., Vereecken H., Brüggemann N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil // Europ. J. Soil Sci. 2016. 67. P. 23–39.
16. Задорожний А.Н., Семенов М.В., Ходжаева А.К., Семенов В.М. Почвенные процессы продукции,

- потребления и эмиссии парниковых газов // Агрохимия. 2010. № 10. С. 75–92.
17. *Paśmionka I.B., Bulski K., Boligłowa E.* The participation of microbiota in the transformation of nitrogen compounds in the soil – a review // Agronomy. 2021. № 11(5). P. 977.
 18. *Robertson G.P., Groffman P.M.* Chapter 14 – Nitrogen transformations // Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. 2024. P. 407–438.
 19. *Hayatsu M., Tago K., Saito M.* Various players in the nitrogen cycle: diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification // Soil Sci. Plant Nutr. 2008. V. 54. Iss. 1. P. 33–45.
 20. *Ollivier J., Töwe S., Bannert A., Hai B., Kastl E.-M., Meyer A., Su M.X., Kleineidam K., Schloter M.* Nitrogen turnover in soil and global change // FEMS Microbiol. Ecol. 2011. V. 78. Iss. 1. P. 3–16.
 21. *Ribeiro H., Mucha A.P., Azevedo I., Salgado P., Teixeira C., Almeida C.M.R., Joye S.B., Magalhães C.* Differential effects of crude oil on denitrification and anammox, and the impact on N₂O production // Environ. Pollut. 2016. 216. P. 391–399.
 22. *Zhao M.Y., Wang S., Li F.M., Guo S.H., Gao P.* Soil oil pollution and its microbial community characteristics in Liaohe oilfield // J. Appl. Ecol. 2020. № 31(12). P. 4215–4224.
 23. *Raimi M.O., Ilesanmi A., Ogah A., Omini D.E.* Exploring how human activities disturb the balance of biogeochemical cycles: evidence from the carbon, nitrogen and hydrologic cycles // Res. World Agricult. Econom. 2021. № 2(3). P. 23–44.
 24. *Федорова Т.Н., Синиговец М.Е., Саранин Е.К., Кузьмич М.А.* Экологические проблемы при углеводородном загрязнении, самоочищение и реабилитация почв // Экология. 2011. № 2. 17 с.
 25. *Liu H., Wu M., Gao H., Gao J., Wang S.* Application of ¹⁵N tracing and bioinformatics for estimating microbial-mediated nitrogen cycle processes in oil-contaminated soils // Environ. Res. 2023. V. 217. P. 114799.
 26. *Chukwu E.Ch., Azuka Ch.V., Okorie B.O.* Effects of different levels of spent engine oil on soil physicochemical properties using different texturally contrasting soils. 2022.
 - DOI:10.21203/rs.3.rs-2231711/v1
 27. *Uquetan U.I., Osang J.E., Egor A.O., Essoka P.A., Alozie S.I., Bawan A.M.* A case study of the effects of oil pollution on soil properties and growth of tree crops in Cross River State, Nigeria // Inter. Res. J. Pure Appl. Physics. 2017. V. 5. 2. P. 19–28.
 28. *Obasi N.A., Eze E., Anyanwu D.I., Okorie U.C.* Effects of organic manures on the physicochemical properties of crude oil polluted soils // Afric. J. Biochem. Res. 2013. V. 7(6). P. 67–75.
 29. *de Jong E.* The effect of a crude oil spill on cereals // Environ. Pollut. Ser. A. Ecol. Biol. 1980. V. 22. Iss. 3. P. 187–196.
 30. *Wyszkowski M., Wyszkowska J., Borowik A., Kordala N.* Contamination of soil with diesel oil, application of sewage sludge and content of macroelements in oats // Water Air Soil Pollut. 2020. V. 231. P. 546.
 31. *Akpan G.U., Udoh B.T.* Evaluation of some properties of soils affected by diesel oil pollution in Uyo, Niger delta area, Nigeria // J. Biol. Agricult. Healthcare. 2013. V. 3. № 8. P. 33–42.
 32. *Barua D., Buragohain J., Sarma S.K.* Certain physicochemical changes in the soil brought about by contamination of crude oil in two oil fields of Assam, NE India // Europ. J. Exp. Biol. 2011. № 1(3). P. 154–161.
 33. *Осипова Р.А., Равзутдинов А.Р., Гилязов М.Ю., Кужамбердиева С.Ж.* Трансформация агрохимических свойств серой лесной почвы под действием нефти в зависимости от уровня и давности загрязнения // Плодородие. 2020. № 3(114). С. 55–60.
 34. *John R.C., Ntino E.S., Itah A.Y.* Impact of crude oil on soil nitrogen dynamics and uptake by legumes grown in wetland ultisol of the Niger delta, Nigeria // J. Environ. Protect. 2016. № 07(04). P. 507–515.
 35. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль удобрений в азотном питании растений при загрязнении почвы нефтью // Агрохимия. 2020. № 4. С. 76–84.
 36. *Булуктаев А.А., Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д.* Изменение эколого-биологических свойств светло-каштановых почв Калмыкии при нефтяном загрязнении // Изв. Саратов. ун-та. Сер. Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13. Вып. 1. С. 102–107.
 37. *Kucharski J., Tomkiel M., Boros E., Wyszkowska J.* The effect of soil contamination with diesel oil and petrol on the nitrification process // J. Elementol. 2010. № 15(1). P. 111–118.
 38. *Швец А.А.* Фиторемедиация загрязненных нефтью почв в условиях Северо-Западного Кавказа: Автoref. дис. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2009. 20 с.
 39. *Amadi A., Abbey S.D., Nma A.* Chronic effects of oil spill on soil properties and microflora of rainforest ecosystem in Nigeria // Water Air Soil Pollut. 1996. V. 86. P. 1–11.
 40. *Niewolak S., Koziello M.* Intensity of some nitrogen transformations in soils experimentally contaminated with crude oil // Pol. J. Environ. Stud. 1998. № 7(3). P. 161–168.
 41. *Wyszkowski M., Ziolkowska A.* Relationship between petrol and diesel oil contamination versus mineral nitrogen content in soil following application of compost, bentonite and calcium oxide // Ecol. Chem. Engin. 2009. V. 16. № 8.
 42. *Ерофеевская Л.А., Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н.* Использование дернообразующих растений в биоремедиации нефтезагрязненных мерзлотных

- почв // Усп. совр. естествознания. 2012. № 11. Ч. 1. С. 128–129.
43. Смирнова Т.С., Панина Ю.Ю. Мониторинг углеводородного загрязнения почвы посредством анализа ее ферментативной активности // Защита окруж. среды в нефтегаз. комплексе. 2015. № 12. С. 33–38.
44. Schutte C.A., Marton J.M., Bernhard A.E. No evidence for long-term impacts of oil spill contamination on salt marsh soil nitrogen cycling processes // Estuaries and Coasts. 2020. V. 43. P. 865–879.
45. Liu H., Wu M., Zhang M., Gao H., Yan Z., Yang Z. New insight into the effect of nitrogen on hydrocarbon degradation in petroleum-contaminated soil revealed through ^{15}N tracing and flow cytometry // Sci. Total. Environ. 2023. V. 891. P. 164409.
46. Фатеев А.И., Мирошниченко Н.Н., Панасенко Е.В., Христенко С.И. Изменение агрохимических и микробиологических свойств нефтезагрязненного чернозема в рекультивационный период // Агрохимия. 2004. № 6. С. 53–60.
47. Kucharski J., Jastrzebska E., Wyszkowska J. Effects of some oil products on the course of ammonification and nitrification // Acta Agr. Silv. Ser. Agr. 2004. V. 42. P. 249–255.
48. Баландина А.В., Жилкин С.М., Кузнецов Д.Б., Дубровина С.С. Восстановительная способность нефтезагрязненных почв при использовании различных препаратов // Совр. пробл. науки и образ-я. 2015. № 5. С. 42–48.
49. Essien O.E., John I.A.J. Impact of crude-oil spillage pollution and chemical remediation on agricultural soil properties and crop growth // Appl. Sci. Environ. Manage. 2010. V. 14(4). P. 147–154.
50. Li H., Zhang Y., Kravchenko I., Xu H., Zhang C. Dynamic changes in microbial activity and community structure during biodegradation of petroleum compounds: a laboratory experiment // J. Environ. Sci. 2007. 19. P. 1003–1013.
51. Colla T.S., Andreatta R., Bücker F., de Souza M.M., Tramontini L., Prado G.R., Frazzon A.P.G., de Oliveira Camargo F.A., Bento F.M. Bioremediation assessment of diesel-biodiesel-contaminated soil using an alternative bioaugmentation strategy // Environ. Sci. Pollut. Res. 2014. V. 21(4). P. 2592–2602.
52. Bouman A.F., Van Drecht G., Van der Hoek K.W. Global and regional surface nitrogen balances in intensive agricultural production systems for the period 1970–2030 // Pedosphere. 2005. V. 15. P. 137–155.
53. Rochette P., Angers D.A., Chantigny M.H., Gasser M.O., MacDonald J.D., et al. NH_3 volatilization, soil NH_4^+ concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates // Canad. J. Soil Sci. 2013. V. 93. P. 261–268.
54. Jahangir M.M.R., Fenton O., Carolan R., Harrington R., Johnston P., Zaman M., Richards K.G., Müller C. Application of ^{15}N tracing for estimating nitrogen cycle processes in soils of a constructed wetland // Water Res. 2020. V. 183. P. 116062.
55. Li Y., Wang C., Wu J., Zhang Y., Li Q., Liu S., Gao Y. The Effects of localized plant–soil–microbe interactions on soil nitrogen cycle in maize rhizosphere soil under long-term fertilizers // Agronomy. 2023. V. 13(8). P. 2114.
56. Gao Y., Yuan L., Du J., Wang H., Yang X., Duan L., Zheng L., Bahar M.M., Zhao Q., Zhang W., Liu Y., Fu Z., Wang W., Naidu R. Bacterial community profile of the crude oil-contaminated saline soil in the Yellow River Delta Natural Reserve, China // Chemosphere. 2022. V. 289. P. 133207.
57. Siles J.A., Margesin R. Insights into microbial communities mediating the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2018. V. 102(10). P. 4409–4421.
58. Sun Y., Ding A., Zhao X., Chang W., Ren L., Zhao Y., Song Z., Hao D., Liu Y., Jin N., Zhang D. Response of soil microbial communities to petroleum hydrocarbons at a multi-contaminated industrial site in Lanzhou, China // Chemosphere. 2022. V. 306. P. 135559.
59. Zhang X., Kong D., Liu X., Xie H., Lou X., Zeng C. Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. // Chemosphere. 2021. V. 273. P. 129666.
60. Polyak Y.M., Bakina L.G., Mayachkina N.V., Chuganova M.V., Bityutskii N.P., Yakkonen K.L., Shavarda A.L. Long-term effects of oil contamination on soil quality and metabolic function // Environ. Geochem. Health. 2023.

DOI: 10.1007/s10653-023-01779-2

Diagnostic Value of Some Indicators of Soil Nitrogen Regime for Assessing the Ecological State of Oil-Pollutant Soils

A. O. Gerasimov^{a, #}, Yu. M. Polyak^a, L. G. Bakina^a

^aScientific Research Center for Ecological Safety of the RASg – St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
Korpusnaya ul. 18, Saint-Petersburg 197110, Russia
[#]E-mail: recchi@rambler.ru

The results of studies of the nitrogen regime of oil-contaminated soils in recent years are considered. Insufficient knowledge of this issue for man-made soils is emphasized, despite the fact that soil pollution with oil and petroleum products can cause significant changes in the nitrogen cycle and lead to irreversible violations of the ecological functions of soils. The generalization of the research results made it possible to identify the most informative indicators for assessing the processes of the nitrogen regime and the ecological state of oil-contaminated soils. Under conditions of oil pollution, the ratio of carbon and nitrogen contents in the soil increases, the nitrifying activity of soils decreases, and the proportion of ammonium forms of nitrogen increases relatively. It is shown that violations of the processes of the nitrogen cycle, the content and the ratio of the contents of different forms of nitrogen characterizing certain stages of its transformation in the soil can be restored to varying degrees during reclamation, depending on the properties of the soil. At the moment, the most promising areas of research into the processes of the nitrogen cycle in oil-contaminated soils are: the study of the vital activity of soil microorganisms carrying out various stages of the nitrogen cycle processes, the relationship of the structure and diversity of the microbiota with the rate of biodegradation of oil and transformation of nitrogen compounds in contaminated soils. The study of the nitrogen cycle processes is important for assessing the effects of soil pollution with petroleum products and choosing the most effective strategies for their restoration.

Keywords: nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, reclamation, microorganisms, oil pollution, soils.