

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.53.054/064+547.62

А.Н. Геннадиев¹, Ю.И. Пиковский², М.А. Смирнова³

УГЛЕВОДОРОДНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ В ЛАНДШАФТАХ: ГЕНЕЗИС, ТИПИЗАЦИЯ

Проведено обобщение и систематизация полученных авторами данных об углеводородном состоянии (УВС) почв природных и техногенно-измененных ландшафтов в пределах одиннадцати ключевых участков на территории России. В качестве компонентов и характеристик УВС почв рассмотрены: а) суммарное содержание и качественный состав битумоидов (веществ, экстрагируемых из почв нейтральными органическими растворителями); б) состав и уровни содержания индивидуальных углеводородных соединений – полициклических ароматических углеводородов, жидких и твердых алканов; в) количество и индивидуальный состав свободных и удерживаемых почвой углеводородных газов. Показано, что различные типы УВС почв определяются их связью с разными группами природных и техногенных процессов: с генерацией углеводородов (УВ) в почвах при участии микроорганизмов; с привнесом УВ с восходящими потоками из литосферы; с их внедрением в почву в результате разливов нефти и нефтепродуктов; с поступлением природных или/и техногенных УВ в на поверхность почвенного покрова из атмосферы; с наследованием почвой УВ, которые находились в почвообразующих породах. Соответственно в качестве основных генетических типов УВС почв были рассмотрены: биогеохимический, эманационный, инъекционный, атмо-седиментационный и литогенный. Показано, что в реальных ситуациях чаще всего встречаются различные варианты комбинаций вышеуказанных типов, что обусловлено множественностью факторов одновременного воздействия на почвы, и одной из задач данного исследования было выявление таких вариантов при изучении УВС почв.

Ключевые слова: битуминозные вещества, полициклические ароматические углеводороды, алканы, газовая фаза почв, факторы почвообразования.

Введение. Углеводородные соединения, природные и/или техногенные, в настоящее время практически повсеместно присутствуют в почвенном покрове. Повышенный интерес к их изучению в последние годы объясняется несколькими причинами. Во-первых, среди этих веществ присутствуют весьма токсичные образования, негативно влияющие на здоровье человека и среду его обитания. Во-вторых, некоторые из них поступают в почвы из глубоких слоев литосферы, и являются маркерами месторождений полезных ископаемых, прежде всего, нефти и газа. И, в-третьих, углеводородные соединения вовлечены в различные внутрипочвенные процессы, связанные с органическим веществом, и исследование этих явлений необходимо для понимания сути почвообразования.

В научной литературе имеются данные практически обо всех углеводородах в почвах. Но в подавляющем большинстве случаев в каждом отдельном исследовании речь идет, как правило, только об одном каком-либо их классе (например, о полициклических ароматических углеводородах, жидких или твердых алканах, газообразных УВ, моноцикличес-

ких аренах и др.). Многообразный комплекс УВ компонентов почв совокупно как целостный объект рассматривается очень редко [Wilcke, 2000; Lai, 2009; Li, Xiong, 2009; Gocke et al., 2013; Serrano-silva et al., 2014., Геннадиев с соавт., 2015]. Между тем, именно такой аспект рассмотрения может дать ценную информацию не только о качестве самих почв и не только о генезисе углеводородов в почвах, но также и о процессах взаимодействия почв и ландшафтов в целом с окружающей средой и их литогенной основой.

Состав УВ в почвах включает в себя битумоиды – растворимые в органических растворителях жидкие и твердые **битуминозные вещества**, а также свободные и удерживаемые почвой газообразные углеводороды (метан, его гомологи, этилен и др.). В составе битумоидов определяют жидкие и твердые углеводороды разных классов, гетероатомные соединения, высокомолекулярные вещества – смолы и асфальтены. В углеводородной фракции битумоидов диагностируют многочисленные индивидуальные соединения разных классов: полициклические ароматические углеводороды, нормальные

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* alexagenna@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., докт. геогр. н.; *e-mail:* lummggu@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* summerija@yandex.ru

и изопреноидные алканы и другие. Комплекс УВ в почвах весьма изменчив в пространстве и времени, поскольку на него оказывают воздействие такие явления и факторы, как: *микробиологическая* трансформация УВ в почвах и их цикличность; восходящие потоки УВ из недр Земли с характерной для них периодичностью; инъекции УВ в почву в результате нерегулярных разливов нефти и нефтепродуктов; поступление УВ на поверхность почвенного покрова с атмосферными выпадениями, подверженными изменчивому метеорологическому фактору и др.

В качестве инструмента для исследования всего разнообразия углеводородных соединений в почвах авторы в течение последнего десятилетия развывают представление об «углеводородном состоянии почв» [Пиковский с соавт., 2008; Геннадиев с соавт., 2016].

Подобно тому, как ранее представления о «гумусовом», «солевом» и «карбонатном состоянии» почв вошли в научный обиход в виде комплексов многоаспектных почвенных характеристик, изучение *углеводородного состояния почв*, включающее интегрированную информацию о целом ряде классов УВ, также может обеспечить новый ракурс научного рассмотрения объектов исследования.

Всестороннее изучение УВС почв является сложной и трудоемкой задачей, которая для своего решения требует определенного времени и на начальном этапе исследований – некоторого упроще-

ния. Поэтому, представляется целесообразным несколько ограничить спектр изучаемых УВ, выбрав из их обширного множества наиболее представительные и информативные соединения. Такими компонентами и характеристиками УВС почв, по нашему мнению, могут быть: а) суммарное содержание и качественный состав битумоидов (веществ, экстрагируемых из почв нейтральными органическими растворителями); б) состав и уровни содержания индивидуальных углеводородных соединений – полициклических ароматических углеводородов, жидких и твердых алканов; в) количество и индивидуальный состав свободных и удерживаемых почвой (адсорбированных и защемленных) углеводородных газов.

В течение 2014–2018 гг. авторами статьи были предприняты детальные исследования УВС различных типов почв на ключевых участках в пределах территории России (**таблица**) [Геннадиев с соавт., 2015, 2016, 2018]. Результатом этой работы стало выделение для каждого ключевого участка генетических типов и вариантов углеводородного состояния почв.

Генетические типы УВС почв определяются их связью с разными группами природных и техногенных процессов, так или иначе влияющих на почвообразование и геохимическую эволюцию почв. Это *биогеохимические* процессы генерации углеводородов в почвах при участии микроорганизмов; *эманационные* процессы, связанные с восходящими

Характеристика ключевых участков исследований

Природная зона (подзона)	Участок и его местонахождение	Факторы формирования УВС почв	Типы УВС почв
Среднетаежная	«Устьянский», Архангельская обл., Вологодская обл.	Гидроморфизм, локальные выделения свободного газа	Биогеохимический, эманационно-биогеохимический
Южнотаежная	«Истринский», Московская обл.	Гидроморфизм, повышенная геодинамическая активность	Эманационно-биогеохимический, биогеохимический
Южнотаежная	«Ногинский», Московская обл.	Загрязнение атмосферы промышленным источником	Инъекционный, атмо-седиментационный
Хвойно-широколиственные леса	«Клепиковский», Рязанская обл.	Микробиологические процессы в болотных ландшафтах	Биогеохимический
Лесная и лесостепная	«Жигулевский», Самарская обл.	Разработка асфальтового месторождения	Эманационно-инъекционный,
Степная	«Сызранский», Самарская обл.	Выделение УВ из горючих сланцев	Эманационный
Сухостепная	«Руднянский», Волгоградская обл.	Повышенная геодинамическая активность	Эманационно-биогеохимический
Полупустынная	«Баскунчакский», Астраханская обл.	Развитие карстовых явлений	Эманационно-биогеохимический
Сухостепная	«Фроловский», Волгоградская обл.	Нефтяные разливы на почве	Инъекционный, инъекционно-эманационный
Лесолуговая	«Камчатский», Камчатский край	Выпадения вулканических пеплов	Литогенный, атмо-седиментационный
Леса хвойно-широколиственные	«Кунаширский», Сахалинская обл.	Фумарольная деятельность	Атмо-седиментационный

потоками УВ в результате приповерхностной или глубинной дегазации литосферного субстрата; **инъекционные** процессы внедрения УВ в почву в результате разливы нефти и нефтепродуктов на поверхности почвы и на глубине трубопроводов; **атмоседиментационные** процессы поступления природных или/и техногенных УВ в почву из атмосферы; наследование почвой УВ, которые находились в почвообразующих породах, то есть – **литогенных** УВ.

В этой связи в качестве основных генетических типов УВС почв были выделены: биохимический, эманационный, инъекционный, атмо-седиментационный и литогенный. В реальных ситуациях чаще всего встречаются различные варианты комбинаций вышеуказанных типов, что обусловлено множественностью факторов одновременного воздействия на почвы, и одной из задач данного исследования является выявление таких вариантов при изучении УВС почв в пределах ключевых участков.

Целью настоящего исследования является анализ и обобщение данных, полученных на ключевых участках, выделение типов УВС почв и характеристика генезиса, специфических параметров и диагностических признаков последних.

Материалы и методы исследований. Изучение УВС почв проводилось в среднетаежных, южнотаежных, широколиственных, лесостепных, степных, сухостепных и полупустынных ландшафтах на одиннадцати ключевых участках, характеризующихся различным сочетанием поступления природных и, в ряде случаев, техногенных углеводородов в почвы (**таблица**).

Для аналитической характеристики УВС почв были использованы стандартизированные количественные параметры, характеризующие газовую, жидкую и твердую фазы углеводородов в почвах. Свободные УВ газы фиксировались непосредственно в поле полевыми газовыми анализаторами. Для анализа удерживаемых почвой УВ газов пробы почв отбирались из генетических почвенных горизонтов в стеклянные контейнеры и сразу герметизировались. Отобранные образцы дегазировались в стационарных условиях на термовакуумном дегазаторе. Анализ углеводородов (C_1-C_4) в свободном и удерживаемом почвенном воздухе проводился методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл 5000.1» [Методика ..., 2005].

Количественные и качественные характеристики битуминозных веществ изучали модифицированным методом люминесцентно-битуминологического анализа по В.Н. Флоровской [Краснопеева, 2007]. Битуминозные вещества экстрагировали из воздушно-сухих навесок почв *n*-гексаном при комнатной температуре. Выход флуоресценции полученного экстракта (гексанового битумоида) измеряли на приборе серии «Флюорат-2М» («Люмэкс»). Качественную характеристику битумоида определяли по цвету и ширине капиллярной вытяжки, а также по соотношению выхода люминесценции в ультрафиолетовой и видимой областях спектра.

В гексановом битумоиде в данном исследовании определяли 11 индивидуальных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ): дифенил, гомологи нафталина, флуорен, фенантрен, антрацен, хризен, пирен, тетрафен, перилен, бенз(а)пирен, бенз(ghi)перилен. Измерения проводились методом спектрофлуориметрического анализа при низкой температуре (спектроскопия Э.В. Шпольского) на спектрофлуориметрическом комплексе «Флюорат-Панорама» («Люмэкс»), дополненного монохроматором «ЛМ-3» [Алексеева, Теплицкая, 1981; Теплицкая с соавт., 1981].

Для определения индивидуальных *n*-алканов и изо-алканов пристана и фитана воздушно-сухие образцы почв экстрагировали хлороформом. Отфильтрованные растворы реэкстрагировали в *n*-гексан и пропускали через адсорбционную колонку с оксидом алюминия II степени активности (по Брокману). Определение алканов проводились на газовом хроматографе.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате исследования на каждом ключевом участке были определены УВС наиболее представительных почв. Основанием для диагностики УВС почв служили химико-аналитические данные, соотношения индикационных параметров углеводородного комплекса в почве и наличие возможных источников УВ на данной территории.

Биогеохимический тип УВС почв и его варианты. Биогеохимический тип УВС почв формируется в результате биогеохимических процессов синтеза углеводородов и трансформации органических компонентов. Субстрат может иметь как природное, так и техногенное происхождение. В большинстве почв, это, в основном, компоненты почвенного гумуса; в техногенно-измененных ландшафтах в процессы биогеохимической трансформации могут поступать органические компоненты отходов.

Биогеохимический тип УВС почв был исследован в неизмененных природных ландшафтах средней и южной тайги, сухой степи, полупустыни, хвойно-широколиственных лесов [Геннадиев с соавт., 2018]. Для этого типа УВС почв характерно низкое (часто на уровне предела чувствительности) содержание всех компонентов углеводородного комплекса. Общее содержание битумоида как правило, менее 50 мг/кг, тип битумоида, в основном, легкий. Среди ПАУ преобладают только низкоконденсированные соединения (гомологи нафталина, фенантрен). Образование более тяжелых ПАУ проблематично. Сумма ПАУ, как правило, не превышает 0,1 мг/кг. Максимум углеводородов приходится на гумусовые горизонты. При полевом обследовании суммарное содержание углеводородных газов в свободном почвенном воздухе не превышает 1–4 ppm. В составе удерживаемого почвенного воздуха обнаружены, в основном, метан и этилен. Для хроматограмм алканов в верхних гумусовых горизонтах характерно явное преобладание нечетных гомологов над четными; максимальные концентрации *n*-алканов приходятся на соединения с 25 и 27 атома-

ми углерода. Наиболее высокие концентрации биогеохимических углеводородов образуются в гидроформных почвах – поймах и на низких террасах рек, в болотистых ландшафтах (участок «Клепиковский»).

Существенно отличается по своим характеристикам биогеохимический тип УВС торфяных почв. В состав битумоида торфов, помимо углеводородов, входят много неспецифических компонентов гумуса, т.н. торфяные липиды. Резко увеличивается содержание битумоидов, ПАУ, УВ газов, *n*-алканов. В составе ПАУ появляются тетрафен и другие 3–4 ядерные соединения. В составе алканов резко увеличивается преобладание нечетных гомологов. В целом УВС торфяных почв изучены очень мало, что связано с большими трудностями диагностики в торфах углеводородных компонентов.

В почвах природных ландшафтов в специфических условиях могут встречаться углеводороды эманиционного происхождения, связанные с дегазацией глубоких слоев литогенного субстрата. При этом образуется смешанный *эманиционно-биогеохимический* тип УВС почв. Такие явления встречены в местах повышенной современной геодинамической активности земной коры (в т.н. морфоструктурных узлах), например, на участках «Истринский» и «Руднянский», а также на участке «Устьянский», на котором в почвах наблюдались довольно активные проявления УВ газа. Следы эманиционных процессов наблюдались в почвах над слоями горючих сланцев, залегающих на глубине несколько десятков метров (участок «Сызранский»). Для эманиционно-биогеохимического типа УВС почв характерна повышенная концентрация УВ газа, в основном, метана со следами углеводородов C_2-C_4 . Могут быть встречены ПАУ с 4–5 кольцами (хризен, пирен, перилен). Концентрации углеводородов, кроме метана, находятся на биогеохимическом уровне (помимо торфов).

Эманиционный тип УВС почв и его варианты. Эманиционный тип УВС почв в чистом виде встречается редко. Он характерен для почв, расположенных над природными и техногенными залежами углеводородов, а также в зонах высокой геодинамической активности. Поступление углеводородов с глубинными эманициями в природных ландшафтах не приводит к существенному изменению всех компонентов углеводородного комплекса почв, поэтому часто выделяется наложенный *эманиционно-биогеохимический* тип УВС почв [Геннадиев с соавт., 2018].

В явном виде эманиционная составляющая УВ комплекса почв проявляет себя над техногенными линзами нефти и нефтепродуктов, а также над потоками сильно загрязненных углеводородами грунтовых вод вблизи дневной поверхности. Особенно ярко эманиционный тип УВС почв проявляет себя в ландшафтах с широким развитием карстового рельефа. Карстовые полости перехватывают и накапливают углеводороды из глубинных эманиций, из загрязненных подземных вод, из поверхностных стоков

нефти и нефтепродуктов, а затем поставляют легкие углеводороды в почвы в виде эманиций [Пиковский с соавт., 2008].

К признакам эманиционных углеводородов относятся: сочетание аномальных концентраций легких битуминозных веществ, ПАУ с преимущественно нафталиновыми структурами, аномальных концентраций углеводородов в почвенном воздухе. Среди ПАУ в почвах, помимо нафталинов, присутствуют флуорен, дифенил, фенантрен, антрацен, хризен, пирен, тетрафен, бенз(а)пирен, бенз(е)пирен, бенз(gh,i)перилен, флуорантен. Над залежами и линзами нефти и нефтепродуктов в составе удерживаемого и свободного почвенного воздуха после метана существенно преобладает бутан. При разливах нефти и нефтепродуктов из трубопроводов, проложенных в почвообразующих породах возникает комбинированное *инъекционно-эманиционное* УВС почв (участок «Фроловский»).

На УВС почв, формирующееся под действием поступления углеводородных газов снизу, может указывать повышенное содержание битумоида и ПАУ в нижних частях почвенного профиля по сравнению с вышележащими горизонтами. Кроме того, на наложенный эманиционный тип может указывать наличие бутана в удерживаемом почвенном воздухе.

Атмо-седиментационный тип и его варианты. Атмо-седиментационный тип УВС почв формируется в результате поступления углеводородов на поверхность почв с атмосферными выпадениями. Источники поступления углеводородов определяют геохимические особенности УВС почв. Атмосфера загрязняется, в основном, техногенными источниками. Особенно распространен этот тип УВС в городских почвах. В отдельных районах источники загрязнения атмосферы могут быть природными, например, как при вулканической деятельности.

Наиболее детально *техногенный атмо-седиментационный* тип УВС почв изучался на ключевом участке «Ногинский» [Геннадиев с соавт., 2016] в зоне влияния локального промышленного источника – завода по производству технического углерода. Атмосферные выпадения в почвах проявляют себя в высоком содержании битумоида смолистого типа, в котором доля ПАУ доходит до 40%. В составе ПАУ наблюдается широкий набор соединений, имеющих от 2-х до 6 бензольных колец. Во всех загрязненных почвах на участке были идентифицированы гомологи нафталина, фенантрен, антрацен, тетрафен, пирен, бенз(а)пирен, перилен, бенз(ghi)перилен. Характерная черта состава ПАУ – присутствие бенз(а)пирена, типоморфного соединения техногенных выбросов. На участке промзоны в верхних 5 см грунта его концентрация достигает 24 мг/кг.

Яркой особенностью техногенных выпадений является выраженный аккумулятивный тип радиального распределения битумоида и ПАУ. На лесных участках глубина проникновения углеводородов не

превышает 5 см, на сельскохозяйственных пахотных землях – соответствует глубине вспашки. Концентрация ПАУ в почвах уменьшается по мере удаления от источника поступления, при этом, наиболее явный тренд уменьшения наблюдается для бенз(а)пирена, тетрафена, пирена, хризена и антрацена. Содержание алканов в почвах при удалении от промышленного источника загрязнения сокращается более резко в сравнении с полиаренами. На удалении более 2 км от завода преобладающими среди алканов являются соединения с нечетным количеством атомов в углеродной цепи, что свидетельствует о преимущественном их поступлении с растительным опадом, а не от техногенного источника. Вместе с тем, бенз(а)пирен был обнаружен в почвах и на удалении более 10 км от завода. При наличии тренда уменьшения концентрации ПАУ по мере удаления от источника обнаруживаются различия в их накоплении в лесных и пахотных почвах, что связано с неодинаковыми условиями их аккумуляции и трансформации. На открытых участках лучше аэрация и фотодеструкция, то есть более благоприятны условия для деградации ПАУ.

В случае активной вулканической или фумарольной деятельности и периодического выпадения ее продуктов на поверхность почв (участки «Камчатский», «Кунаширский»; [Геннадиев с соавт., 2018]) распределение ПАУ и битумоида в почвенном профиле носит неравномерный характер: наблюдается резкая смена максимальных и минимальных содержаний с глубиной, вызванная периодичностью извержения вулкана и фумарольных выбросов и поступления на поверхность углеводородных соединений. Набор ПАУ достаточно разнообразен: встречаются как легкие, так тяжелые пяти- и шестиядерные полиарены. При большой мощности пепла почвообразовательные процессы могут затронуть слой тефры и дать начало *атмо-седиментационно-литогенному* УВС почвы. Но этот процесс в отношении углеводородов практически не изучен.

Инъекционный тип УВС почв. Инъекционный тип УВС формируется в результате непосредственного внедрения углеводородов в почвы в результате природных нефтепроявлений и техногенных поверхностных и внутрпочвенных разливов. Этот тип УВС почв изучается достаточно широко.

Прорыв нефтепровода является одной из наиболее частых причин поступления углеводородов на поверхность или в приповерхностные горизонты почв. В данном случае нефтяные углеводороды полностью маскируют свойства и особенности природных углеводородов. Содержание битумоида в почве может составлять несколько тысяч мг/кг (до 24 000 мг/кг на участке «Фроловский»). Высокими концентрациями в почвах выделяются суммы ПАУ и *n*-алканов. Среди полиаренов преобладают гомологи нафталина и фенантрен, однако встреча-

ются и более тяжелые соединения – бенз(а)пирен и бенз(ghi)перилен. Тип битумоида маслянистый и маслянисто-смолистый. В составе удерживаемых почвенных газов наряду с метаном встречается бутан. Показательной является хроматограмма нормальных алканов, выделенных из нефтезагрязненных почв: максимальные концентрации характерны для соединений с 20-ю атомами углерода, а содержание четных и нечетных алканов приблизительно одинаково. В почвах, подверженных недавнему нефтяному загрязнению, наблюдаются высокие содержания изо-алканов пристана и фитана. Отметим, что деградация изо- и *n*-алканов в сухостепных ландшафтных условиях происходит быстрее в сравнении с полиаренами. Почвы, подвергавшиеся нефтяному загрязнению, через 10 лет по алканам практически не отличаются от фоновых почв, хотя суммарное содержание ПАУ за этот срок в фоновой почве значительно ниже (до 0,32 мг/кг), чем в загрязненной (1,6 мг/кг). На территории Бахилковского асфальтового приповерхностного месторождения (Самарская область) был выделен *эманационно-инъекционный* вариант УВС почв, отличающийся аномальными (в среднем 5000–7000 мг/кг) содержаниями тяжелых смолистых битумоидов по всему профилю почв и высокими содержаниями ПАУ (участок «Жигулевский»).

Выводы:

– введение понятия «углеводородное состояние почв» и использование его характеристик позволяет выявить генезис и установить индикационные свойства всего комплекса углеводородных соединений в почвах и ландшафтах в целом;

– по составу и соотношению УВ газов, битуминозных веществ, индивидуальных соединений (полициклических ароматических углеводородов и алканов) удается выделить различные типы и варианты УВС почв, отличающиеся преобладанием углеводородов того или иного генезиса; это позволяет, прежде всего, установить источник воздействия на почвы конкретных природных и техногенных процессов в том или ином районе;

– практическая значимость исследования типов УВС почв не ограничивается выявлением источников поступления углеводородов; появляется инструмент для прогнозирования эволюции качества почв и рисков их деградации;

– учет типов УВС почв должен помочь правильно выбирать способы восстановления и рекультивации загрязненных земель;

– диагностика эманационных процессов в почвенном покрове на основе использования данных об УВС почв может способствовать обнаружению техногенных линз углеводородов, образовавшихся на небольшой глубине, потоков загрязненных грунтовых вод, а также установлению сигналов от глубоких залежей нефти и газа.

Благодарности. Обобщение и анализ полученных материалов по исследованным участкам проведены за счет средств Российского научного фонда – проект РНФ № 14-17-00193-п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А. Спектрофлуориметрические методы анализа полициклических ароматических углеводородов в природных и техногенных средах. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 215 с.
- Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Пиковский Ю.И., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С., Хлынина Н.И. Углеводородное состояние почв в условиях загрязнения атмосферы локализованным промышленным источником // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1068–1078.
- Геннадиев А.Н., Киселева А.Ю., Пиковский Ю.И., Смирнова М.А. Влияние геологического фактора на полиарены в почвах // Почвоведение. 2018. № 8. С. 1–8.
- 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.
- Краснопеева А.А. К методике люминесцентного анализа нефтепродуктов в почвах // Сб. мат-лов 2-й междунар. научн. конф. «Современные проблемы загрязнения почв». М.: Факт-почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Докучаев.о-во почвоведов, Рос.фонд фундам.исслед., 2007. Т. 2. С. 200–203.
- Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C_1 – C_5 и непредельных углеводородов (этена, пропена, бутенов) в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии ПНД Ф 13.1:2:3.23-98. М.: ФГУ «ФЦАО», 2005. 20 с.
- Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Оборин А.А. и др. Углеводородное состояние почв на территории нефтедобычи с карстовым рельефом // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1314–1323.
- Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А., Оглоблина А.И. Принципы люминесцентно-спектральной диагностики токсичных и канцерогенных углеводородов // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 100–117.
- Gocke M., Kuzyakov Y., Wiesenberg G.L.B. Differentiation of plant derived organic matter in soil, loess and rhizoliths based on n-alkane molecular proxies // Biogeochemistry. 2013. V. 112. № 1–3. P. 23–40.
- Lai D.Y.F. Methane Dynamics in Northern Peatlands: A Review // Pedosphere. 2009. V. 19. № 4. P. 409–421.
- Li Y., Xiong Y. Identification and quantification of mixed sources of oil spills based on distributions and isotope profiles of long-chain n-alkanes // Marine Pollution Bulletin. 2009. V. 58. P. 1868–1873.
- Serrano-silva N., Sarria-guzman Y., Dendooven L., Lunagudo M. Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review // Pedosphere. 2014. V. 24. № 3. P. 291–307.
- Wilcke W. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil – a Review // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2000. V. 163. P. 229–248.

Поступила в редакцию 12.07.2018
Принята к публикации 20.07.2018

A.N. Gennadiev¹, Yu. I. Pikovskiy², M.A. Smirnova³

HYDROCARBON STATUS OF SOILS IN LANDSCAPES:
GENESIS AND TYPIFICATION

Authors generalized and systematized original data on the hydrocarbon status (HCS) of soils in natural and technogenic landscapes within eleven key sites of the territory of Russia. The components and characteristics of HCS of soils are the following: a) the total content and qualitative composition of bitumoids (substances extracted from soils by neutral organic solvents); b) composition and concentration of individual hydrocarbon compounds – polycyclic aromatic hydrocarbons, liquid and solid alkanes; c) the amount and individual composition of free and retained soil hydrocarbon gases. It is shown that different types of HCS of soils are determined by their connection with different groups of natural and technogenic processes: generation of hydrocarbons (HC) in soils by microorganisms; accumulation of hydrocarbons from the lithosphere gas flows; HC input from oil and oil-products spills; accumulation of natural and/or technogenic HC on soil surface from the atmosphere; inheritance of parent rock hydrocarbons by soils. Accordingly, the following main genetic types of HCS of soils were considered: biogeochemical, emanation, injection, atmo-sedimentation and lithogenic. It is shown that different variants of combinations of the above types are the most typical in real situations, which is due to the multiplicity of factors acting simultaneously on soils, and one of the tasks of the study was the identification of such variants in the process of the analysis of HCS of soils.

Key words: bituminous substances, polycyclic aromatic hydrocarbons, alkanes, gaseous phase of soils, soil forming factors.

Acknowledgements. Generalization and analysis of materials for the studied areas were financially supported by the Russian Science Foundation (project №14-17-00193-п).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* alexagenna@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; *e-mail:* lummgu@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* summerija@yandex.ru

REFERENCES

- Alekseeva T.A., Teplickaja T.A.* Spektrofluorimetricheskie metody analiza policiklicheskih aromaticeskikh uglevodorodov v prirodnyh i tehnogennyh sredah [Spectrum fluorimetric methods for the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural and technogenic landscapes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 215 p. (In Russian).
- Gennadiy A.N., Kiseleva A.Yu., Pikovskii Yu.I., Smirnova M.A.* Effect of the Geological Factor on Polyarenes in Soils // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51 № 8. P. 879–886.
- Gennadiy A.N., Zhidkin A.P., Pikovskii Y.I., et al.* Hydrocarbon status of soils under atmospheric pollution from a local industrial source // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49 № 9. P. 1003–1012.
- Gennadiy A.N., Pikovskii Yu.I., Smirnova M.A., Tsibart A.S.* Hydrocarbons in soils: Origin, composition, and behavior (review) // Eurasian Soil Science. 2015b. V. 48. № 10. P. 1195–120.
- Gocke M., Kuzyakov Y., Wiesenberg G.L.B.* Differentiation of plant derived organic matter in soil, loess and rhizoliths based on n-alkane molecular proxies // Biogeochemistry. 2013. V. 112. № 1–3. P. 23–40.
- Krasnopeeva A.A.* K metodike ljuminescentnogo analiza nefteproduktov v pochvah [On the technique of luminescent analysis of petroleum products in soils] // Proceedings of the II International Conference «Modern Problems of Soil Pollution». Moscow, 2007. V. 2. P. 200–203 (In Russian).
- Lai D.Y.F.* Methane Dynamics in Northern Peatlands: A Review // Pedosphere. 2009. V. 19. № 4. P. 409–421.
- Li Y., Xiong Y.* Identification and quantification of mixed sources of oil spills based on distributions and isotope profiles of long-chain n-alkanes // Marine Pollution Bulletin. 2009. V. 58. P. 1868–1873.
- Metodika vypolnenija izmerenij massovyh koncentracij predel'nyh uglevodorodov S1-S5 i nepredel'nyh uglevodorodov (jetena, propena, butenov) v atmosfernom vozduhe, vozduhe rabochej zony i promyshlennyh vybrosah metodom gazovoj hromatografii PND F 13.1:2:3.23–98 [Methods of measurement of mass concentrations of C₁–C₅ saturated hydrocarbons and unsaturated hydrocarbons (ethene, propene, butene) in the ambient air, workplace air and industrial emissions by PND F 13.1 GC: 2: 3.23–98], Moscow, FGU «FCAO», 2005, 20 p. (In Russian).
- Pikovskii Yu.I., Gennadiy A.N., Puzanova T.A., Krasnopeeva A.A., Zhidkin A.P., Oborin A.A.* Hydrocarbon status of soils in an oil-producing region with karst relief // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. № 11. P. 1162–1170.
- Serrano-Silva N., Sarria-guzman Y., Dendooven L., Lunagudo M.* Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review // Pedosphere. 2014. V. 24. № 3. P. 291–307.
- Teplickaja T.A., Alekseeva T.A., Ogloblina A.I.* Principy ljuminescentno-spektral'noj diagnostiki toksichnyh i kancerogennyh uglevodorodov [Principles of luminescence-spectral diagnostics of toxic and carcinogenic hydrocarbons]. Tehnogennye potoki veshhestva v landshaftah i sostojanie jekosistem. Moscow: Nauka, 1981. P. 100–117 (In Russian).
- Wilcke W.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil – a Review // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2000. V. 163. P. 229–248.

Received 12.07.2018

Accepted 20.07.2018