

прогноз состояния окружающей среды, от которых во многом зависят подходы к нормированию допустимой концентрации загрязняющих веществ, выбор способа рекультивации загрязненных нефтью земель, организация наблюдения за состоянием ландшафтов.

Методология прогноза экологического состояния ландшафтов в связи с воздействием нефтегазового комплекса в качестве одного из главных подходов включает комплексную картографическую визуализацию искомой информации, осуществляемую на разных территориальных уровнях — от обширных территорий, охватывающих всю страну или административную область, до уровня отдельных нефтепромыслов [2, 8, 14, 23].

В основу разработки такого рода прогнозных эколого-геохимических карт положено представление М.А. Глазовской о *технобиогеомах* — прогнозных районах, в которых изменения среды при тех или иных техногенных воздействиях происходят по сходному сценарию [7]. При этом потенциал самоочищения и устойчивость природной среды к загрязнению углеводородами определяются соотношением следующих основных процессов: а) *аккумуляцией поллютантов* (на это влияет гумусность почв, характер растительного опада, гранулометрический состав почв и грунтов и др.); б) *трансформацией или разложением поллютантов* (здесь важны гидротермические условия, биологическая активность почв и др.); в) *выносом и рассеянием поллютантов* (сумма осадков, водный режим почв, наличие геохимических барьеров, ландшафтно-геохимическая позиция и др.). Указанные процессы действуют, образуя разные комбинации в различных физико-географических и ландшафтно-геохимических обстановках. Для оценки устойчивости ландшафта в целом особенно важно определить потенциал самоочищения почв — компонента, в котором в основном депонируется поллютант и происходят его превращения и миграция.

Факторы, способствующие или препятствующие процессам самоочищения почв, делятся на две группы. Первая группа — это свойства самой почвы, вторая — физико-географические условия, в которых находится почва, в первую очередь это климатические факторы. Факторы самоочищения каждой из групп на основе интегрированного учета их характеристик получают суммарную экспертную оценку силы. Градация силы факторов зависит от заданной детальности оценки и наличия необходимого фактического материала.

В качестве базы данных при составлении прогнозных эколого-геохимических карт используются совокупности следующих почвенных и климатических характеристик: мощность органогенных и гумусовых горизонтов, распространение постоянно мерзлого слоя, водный и окислительно-восстановительный режимы почв, запасы капиллярной влаги, продолжительность вегетационного периода, годовая сумма почвенных температур, годовое количество осадков и

некоторые другие. Кроме того, при выборе критериев самоочищения почв от нефти, нефтепродуктов и ПАУ используются результаты комплексных полевых экспериментов по изучению факторов самоочищения почв от нефти в разных природных зонах [1].

Основанная на этих подходах методология позволяет создавать прогнозные эколого-геохимические карты разного масштаба, выделять на них значимые локальные или региональные характеристики природной среды. Обширный комплекс детальных базовых и прогнозных карт создан для территории основных нефтяных месторождений Калининградской области, разрабатываемых компанией «Лукойл-Калининградморнефть». Здесь прогнозные карты — это карты потенциала самоочищения почвенного покрова и поверхностных вод, чувствительности растительного покрова, вероятности загрязнения грунтовых вод [13]. Среднемасштабная карта относительной устойчивости почв к углеводородному загрязнению для всей Калининградской области создана на основе синтеза карт группировки почв по условиям деградации и рассеяния углеводородов. При создании этой карты использовались процедуры ГИС-технологий, которые включают создание баз данных, аналитических и промежуточных синтетических карт и итоговых синтетических карт, характеризующих текущее и прогнозное эколого-геохимическое состояние ландшафтов и почв [19].

Другой пример среднемасштабной карты — карта устойчивости почвенного покрова дельты Волги к воздействию техногенных углеводородов. Техногенные угрозы окружающей среде и экосистемам со стороны нефтегазового комплекса в этом районе постоянно нарастают (Астраханский газоконденсатный завод, освоение месторождений нефти на морском шельфе). Поэтому такие карты служат базой для прогноза и экологической оптимизации нефтяного производства [28].

И наконец, мелкомасштабные карты для всей России. Последняя по времени карта такого охвата — «Карта потенциальной способности почв Российской Федерации к самоочищению от нефти и нефтепродуктов» — позволила на основе описанных выше критериев дифференцировать территорию страны по способности почвенного покрова к самоочищению от углеводородов на субконтинентальном уровне и выявить соответствующие крупные группировки почв, приуроченные к определенным картографическим ареалам (рис. 5, табл. 2) [2]. В этом плане на карте показаны следующие выделы, отражающие уровни потенциальной способности почв к самоочищению от нефти, нефтепродуктов и ПАУ.

1. *Почвы с самой низкой потенциальной устойчивостью к загрязнению углеводородами (низкая скорость деградации и слабое рассеяние)* распространены на самом севере азиатской части России, занимают также большую часть Западно-Сибирской низменности между Уралом и Енисеем, Среднесибирское

Таблица 2

Разделение территории России по потенциальной устойчивости почв к углеводородному загрязнению, по [2]

Номер почвенно-экологического ареала на карте	Скорость физико-химической и биологической деградации углеводородов	Интенсивность механического рассеяния углеводородов	Относительная устойчивость почв к нефтяному загрязнению
Почвы равнинных территорий			
1	Низкая	Слабая	Низкая
2	То же	Умеренная	
3	То же	Сильная	
4	Умеренная	То же	Пониженная
5	Высокая	Умеренная	
6	То же	Сильная	Высокая
Почвы горных территорий			
7	Низкая	Слабая	Низкая
8	Умеренная	Сильная	Пониженная
9	Высокая	То же	Высокая
Аллювиальные почвы			
10	Низкая	Слабая	Низкая
11	То же	Умеренная	
12	Умеренная	Сильная	Пониженная
13	Высокая	То же	Высокая

плоскогорье между Енисеем и Леной. Это в основном арктические, арктотундровые, тундровые глеевые и тундрово-болотные, болотные торфяные почвы равнинных территорий, находящиеся в зоне холодного и очень холодного теплового режима.

2. *Почвы с пониженной устойчивостью (с низкой и умеренной скоростью разложения углеводородов, но с*

их сильным рассеянием) занимают Север европейской территории России, юг Западной и Средней Сибири, включая районы Прибайкалья и Присаянья, а также горные территории Северо-Востока России, большей части Камчатки и севера Сахалина. Это почвы тундровые иллювиально-подзолистые, тундровые болотные, глееподзолистые на равнинах, тундровые примитивные на Урале, на плато Путоран и Таймыре. В Средней Сибири эту группу составляют в основном таежные мерзлотные и глеево-мерзлотные почвы, а в Прибайкалье и Присаянье в эту зону входят дерново-подзолистые, дерново-карбонатные и дерново-таежные почвы. Сюда же относятся песчаные почвы с промывным водным режимом (радиальное рассеяние) и верховые болотные почвы с водозастойным режимом (латеральное рассеяние).

3. *Почвы с высокой устойчивостью (с высокой скоростью разложения, умеренным и сильным рассеянием углеводородов)* занимают в основном полупустынные районы Прикаспийской низменности, Нижнего Поволжья, Калмыкии и представлены главным образом солонцами, бурыми пустынно-степными (в том числе солонцеватыми), светло-каштановыми, каштановыми и темно-каштановыми солонцеватыми почвами. Отдельные массивы почв с таким же потенциалом самоочищения выделены в Юго-Восточном Зауралье, районах Алтая, Саян, Забайкалья и Приамурья. Почвы, обладающие наиболее высокой по сравнению с другими территориями России скоростью разложения углеводородов и сильным рассеянием, занимают значительную часть европейской территории России (за исключением самых северных районов и полупустынных земель Нижнего Поволжья и Калмыкии) —

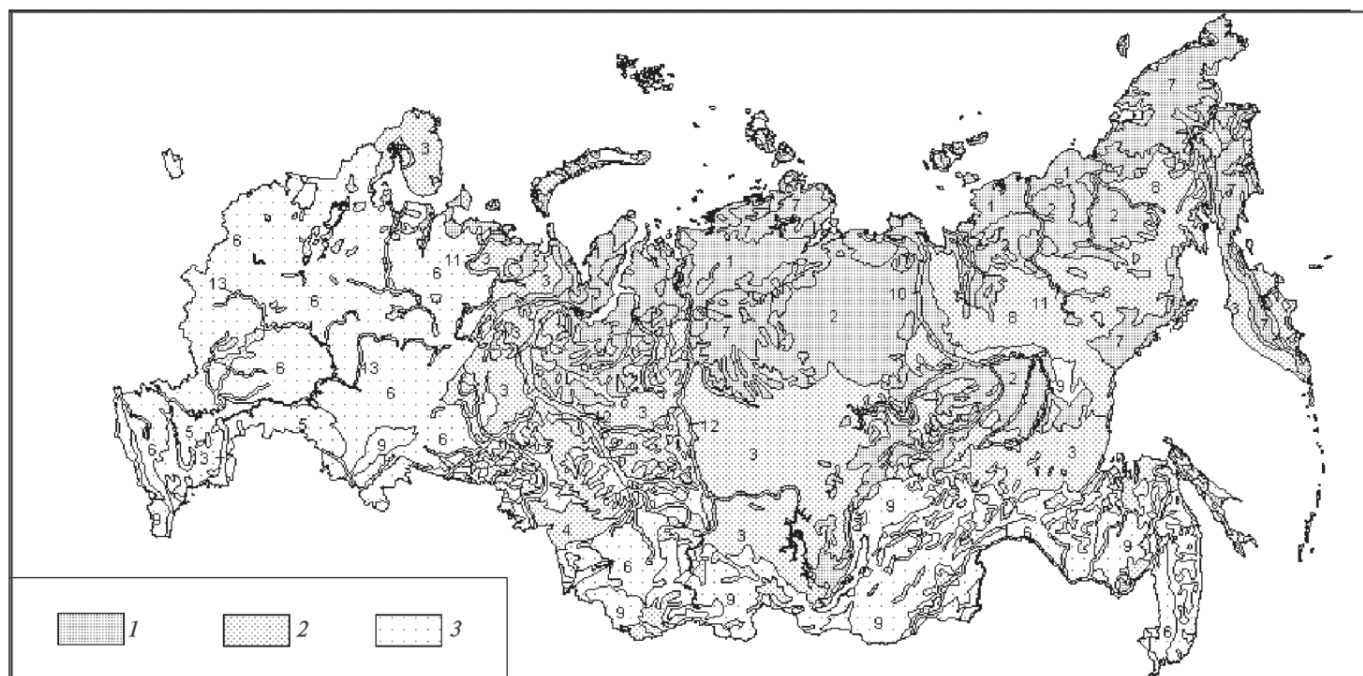


Рис. 5. Районирование территории Российской Федерации по устойчивости почв к загрязнению техногенными углеводородами, по [2]: 1 — почвы с низкой устойчивостью; 2 — почвы с пониженной устойчивостью; 3 — почвы с высокой устойчивостью. Цифры на карте указывают на территории с различным соотношением факторов деградации и рассеяния углеводородов согласно данным табл. 2

подзолистые, серые лесные и дерново-подзолистые почвы, разные типы черноземов (главным образом выщелоченные, местами обыкновенные, типичные, и др.), боровые пески. К районам с почвами с наиболее высоким потенциалом самоочищения относятся горные и предгорные территории Алтая, Западных Саян, Забайкалья, Приморья, Южного Сахалина.

Подобные карты опубликованы в материалах Совета безопасности РФ [29], в Экологическом атласе России [30], в атласе «Природные ресурсы и экология России» [20] и в Национальном атласе России [12].

Результаты исследований, о которых говорилось выше, в значительной степени использованы в практической деятельности нефтяного комплекса и способствовали сохранению природной среды в различных регионах России. Вместе с тем по-прежнему

актуально изучение и решение целого ряда проблем, связанных с созданием надежной системы экологической безопасности в районах добычи, переработки и транспортировки нефти и нефтепродуктов. К ним относятся проблемы нормирования загрязнения ландшафтов сложными смесями углеводородов и установление допустимой концентрации поллютантов в различных физико-географических условиях, проблемы совершенствования методологии мониторинга углеводородного загрязнения, дальнейшей разработки и строгого соблюдения технологий санации и рекультивации загрязненных территорий. При этом реальный эффект от полученных научных результатов будет иметь место только при тесной кооперации и взаимопонимании исследователей, производственников и региональных властей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем / Под ред. М.А. Глазовской. М.: Наука, 1988.
2. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И. Карты устойчивости почв к загрязнению нефтепродуктами и полициклическими ароматическими углеводородами: метод и опыт составления // Почвоведение. 2007. № 1. С. 80–92.
3. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Порохнин А.П., Чернянский С.С. Экологическое обеспечение нефтегазовых работ на мелководных шельфах мира // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2003. № 2. С. 43–50.
4. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Флоровская В.Н. и др. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996.
5. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Чернянский С.С. и др. Формы и факторы накопления полициклических ароматических углеводородов в почвах при техногенном загрязнении (Московская область) // Почвоведение. 2004. № 7. С. 804–818.
6. Глазовская М.А. Теория геохимии ландшафтов в приложении к изучению техногенных потоков рассеяния и анализу способности природных систем к самоочищению // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981.
7. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988.
8. Глазовская М.А., Пиковский Ю.И., Коронцевич Т.И. Комплексное районирование территории СССР по типам возможных изменений природной среды при нефтедобыче // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. Вопросы географии. Вып. 120. М.: Мысль, 1983. С. 84–108.
9. Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982.
10. Дорохова М.Ф. Водоросли как перспективный объект почвенного экологического мониторинга в районах добычи нефти // Современные проблемы загрязнения почв: Междунар. науч. конф. М., 2004. С. 206–207.
11. Краснопеева А.А. Природные битумоиды в почвах лесной зоны: люминесцентная диагностика и уровни содержания // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1453–1465.
12. Национальный атлас России. Т. 2. М.: Роскартография, 2007.
13. Нефть и окружающая среда Калининградской области / Под ред. Ю.С. Каджояна, Н.С. Касимова. М.: Калининград: Янтарный сказ, 2008.
14. Никифорова Е.М. Почвенно-геохимические условия разложения и миграции нефтепродуктов в ландшафтах СССР // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. Вопросы географии. Вып. 120. М.: Мысль, 1983. С. 130–145.
15. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993.
16. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Краснопеева А.А., Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 5. С. 28–35.
17. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Пузанова Т.А. и др. Углеводородное состояние почв на территории нефтедобычи с карстовым рельефом // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1314–1323.
18. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С. О диагностике и нормировании загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Основной ресурс. 2005. № 1. С. 78–80.
19. Пиковский Ю.И., Геннадиева А.А. ГИС для оценки устойчивости почв к загрязнению техногенными углеводородами (на примере Калининградской области) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2004. № 3. С. 18–24.
20. Природные ресурсы и экология России: Атлас. М., 2003.
21. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
22. Солнцева Н.П. Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели) // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 23–42.
23. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998.
24. Солнцева Н.П. Эволюционные тренды почв в зоне техногенеза // Почвоведение. 2002. № 9. С. 1119–1127.

25. Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем / Под ред. М.А. Глазовской. М.: Наука, 1981.

26. Флоровская В.Н. Люминесцентно-битуминологический метод в нефтяной геологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1957.

27. Чернянский С.С., Волосатова Ю.В., Краснопеева А.А. Особенности формирования аномалий полиароматических углеводородов в почвенном покрове // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География. 2007. № 2. С.31–37.

28. Шурубор Е.И., Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И. Карта условий аккумуляции, трансформации и миграции органических поллютантов в почвах Нижнего Поволжья // Аридные экосистемы. 1998. Т.4, № 8. С.109–117.

29. Экологическая безопасность России. Вып.1. М.: Юридическая литература, 1994.

30. Экологический атлас России. М.: ЗАО Карта, 2002.

Поступила в редакцию
12.05.2009

A.N. Gennadiev

OIL AND THE ENVIRONMENT

The article systematizes the results of studies on the environmental effects of oil and oil products. The processes of migration, transformation and accumulation of hydrocarbon pollutants in landscapes are described from the geochemical point of view, and the problems of their modeling are discussed. A number of indicators for oil pollution sources are described, as well as the ways to provide for environmental safety during oil fields development. Cartographic visualization is applied to analyze the principles and the experience of forecasting the geochemical state and resistance of landscapes in the areas of hydrocarbons extraction and processing.

Key words: environment, oil, oil products, polycyclic aromatic hydrocarbons, pollution, reclamation.

УДК 502.65:553.982.2

А.Н. Геннадиев¹

НЕФТЬ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА²

Обобщены и систематизированы результаты исследований по проблеме воздействия нефти и нефтепродуктов на окружающую среду. Дается геохимическая характеристика процессов миграции, трансформации и аккумуляции углеводородных поллютантов в ландшафтах, рассматриваются вопросы моделирования этих явлений. Характеризуются различные индикаторы источников нефтяного загрязнения и подходы к обеспечению экологической безопасности при освоении месторождений нефти. Анализируются принципы и опыт прогнозирования геохимического состояния и устойчивости ландшафтов в районах добычи и переработки углеводородного сырья с помощью картографической визуализации.

Ключевые слова: охрана окружающей среды, нефть, загрязнение, полициклические ароматические углеводороды, эколого-геохимические карты.

Введение. Добыча, переработка и транспортировка нефти являются в настоящее время стержневыми отраслями российской экономики и по объемам производства, и по значимости для многих регионов страны. Весьма масштабным оказывается влияние этого рода хозяйственной деятельности на состояние окружающей среды. Экологическими проблемами, связанными с нефтью, занимаются специалисты различных наук. Существенный вклад в разработку этих вопросов вносит и современная географическая наука.

На географическом факультете МГУ нефтяной тематикой занимаются ряд кафедр и лабораторий: проблемами прокладки нефтепроводов через водные преграды — специалисты-гидрологи, мерзлотные явления в зонах добычи и транспортировки нефти исследуют криолитоологи, картографическое обеспечение факультетских работ в этой области проводится сотрудниками кафедры картографии и геоинформатики. В статье сосредоточено внимание на работах кафедры геохимии ландшафтов и географии почв и показано, какие задачи в рамках рассматриваемой проблемы решают ее специалисты.

Нефтяную эколого-геохимическую тематику начали разрабатывать на кафедре под руководством М.А. Глазовской и В.Н. Флоровской в начале 1970-х гг. М.А. Глазовская создала новое научное направление — *геохимию техногенных ландшафтов*, которое включало общую теорию миграции поллютантов в природных комплексах, принципы эколого-геохимического прогнозирования и районирования, представление о «технобиогеомах» — территориальных природных единицах со сходными ответными реакциями на возможное техногенное воздействие и ряд других ключевых составляющих [6]. В.Н. Флоровская была ведущим специалистом страны в области люминесцентной битуминологии, геохимии углеродистых веществ в горных породах, геохимических методов поисков месторождений нефти и газа [26].

Сотрудничество двух выдающихся ученых дало импульс развитию исследований по *геохимии нефти в окружающей среде*. Научные методы, применявшиеся для поисков и диагностики углеродистых веществ в геологических объектах, были адаптированы для анализа распространения техногенной нефти и нефтепродуктов в компонентах ландшафта. Разработаны схемы районирования территории страны по типам возможных изменений природной среды при нефтедобыче, строительстве нефтепроводов и транспортировке нефти, проведено обоснование системы фоновой мониторинга техногенных углеводородов в СССР и странах Восточной Европы. Пионерами этих работ были Ю.И. Пиковский, Н.П. Солнцева, Т.А. Теплицкая и другие исследователи [8, 9, 25].

К настоящему времени сотрудниками кафедры опубликовано около десяти монографий, касающихся рассматриваемой проблемы. Последняя по времени опубликования — монография «Нефть и окружающая среда Калининградской области» [13], в подготовке которой, кроме геохимиков и почвоведов, принимали участие биогеографы, геоморфологи и картографы факультета. Отметим также книги Н.П. Солнцевой «Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов» [23], А.Н. Геннадиева, Ю.И. Пиковского, В.Н. Флоровской и др. «Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах» [4], Ю.И. Пиковского «Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде» [15], Ф.Я. Ровинского, Т.А. Теплицкой, Т.А. Алексеевой «Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов» [21] и др.

В статье акцент сделан на исследованиях, введенных на кафедре в последние годы совместно с крупными нефтяными компаниями «Лукойл», «Каспийская нефтяная компания», «Тенгизшевройл» и др. Наряду с решением актуальных прикладных задач эти исследования дали обширный фактический материал для разработки теоретических эколого-

¹ Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, профессор, докт. геогр. н., e-mail: gennad@geogr.msu.ru

² Статья подготовлена на основе доклада, сделанного автором на Международной конференции «Университетская география в начале XXI века», посвященной 70-летию географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

геохимических проблем, к которым относятся: 1) геохимическая характеристика и моделирование процессов миграции, трансформации и аккумуляции нефти и нефтепродуктов в природной среде; 2) индикация источников загрязнения природной среды и обеспечение эколого-геохимической безопасности при освоении нефтяных месторождений; 3) прогноз эколого-геохимического состояния и устойчивости ландшафтов в районах добычи и переработки нефти.

Геохимическая характеристика и моделирование процессов миграции, трансформации и аккумуляции нефти и нефтепродуктов в природной среде. Изучение особенностей поведения техногенных углеводородов

в природной среде дает базовые представления для решения остальных научных и практических задач. Только зная фундаментальные взаимосвязи процессов миграции, трансформации и аккумуляции нефти и нефтепродуктов с почвенными, геоморфологическими, гидрологическими и другими ландшафтными условиями, можно прогнозировать опасность загрязнения поллютантами природной среды и предпринимать соответствующие защитные меры. Модельные исследования техногенных потоков углеводородов, образующихся при технологических разливах и утечках, проводились на нефтяных промыслах Западной Сибири, Пермского Прикамья, Калининградской области, Севера европейской части России и др. Репрезентативные ключевые участки выбирались таким образом, чтобы они были в наибольшей степени обеспечены информацией о точной дате, объеме и формах поступления загрязняющего вещества в те или иные компоненты ландшафта. Методика изучения процессов миграции и аккумуляции нефти и нефтепродуктов включала [22, 23]: 1) исследование серий датированных эталонных объектов, различающихся сроками загрязнения; 2) прямые динамические наблюдения на одних и тех же объектах; 3) полевые эксперименты с внесением нефти и нефтепродуктов в почвы по схеме доза—время—эффект; 4) лабораторное моделирование нефтеемкости—нефтеотдачи почв на почвенных монолитах.

На основе опробования почв и грунтов на ключевых участках и определения в собранных образцах концентрации нефти, нефтепродуктов, солей буровых сточных вод выявлены типы ореолов загрязнения, их территориальная структура, характер развития и устойчивость во времени, а также связь с источниками загрязняющих веществ, установлены различные формы аккумуляции поллютантов в почвах и донных отложениях, особенности радиального и латерального распределения, динамика их трансформации (рис. 1).

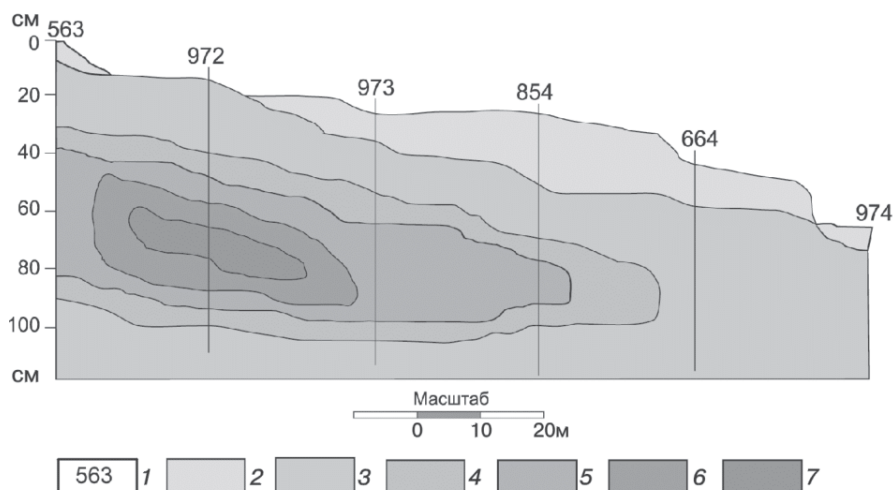


Рис. 1. Распределение нефти в профиле почв, загрязненных стоками от кустовой площадки: 1 — номера точек опробования; 2–7 — содержание нефтепродуктов (г/кг почвы): 2 — <1; 3 — 1–2; 4 — 2–4; 5 — 4–6; 6 — 6–8; 7 — >8, по [13]

Наиболее общая закономерность поведения нефти в почвах — ее фракционирование в процессе миграции, т.е. пространственная дифференциация вещества по плотности, вязкости, диффузионной способности, тесноте взаимодействия с почвенной массой. В почвах, как в хроматографической колонке, нефтяной поток разделяется на более тяжелые высокомолекулярные асфальтово-смолистые компоненты, которые при формировании ореола загрязнения из-за своей относительно малой подвижности аккумулируются в позициях, приближенных к источнику поллютантов, а также на более легкие низкомолекулярные компоненты, мигрирующие на более значительное расстояние. При этом легкие нефтяные компоненты вследствие высокой токсичности и большей устойчивости к микробиологическому разложению дольше сохраняются в почвах, главным образом в ее глубоких горизонтах. Так, экспериментально показано, что отношение подвижных гексановых фракций битумоидов к хлороформным фракциям может изменяться от 0,5–1 в ядре ореола загрязнения до 2–5 в краевой части ореола, удаленной от ядра на несколько сотен метров [15, 23].

Особенности распределения нефтяных компонентов в почвах определяются следующими основными факторами: морфологическим строением почв и их химическими свойствами, положением почвы в ландшафтно-геохимическом сопряжении, наличием радиальных и латеральных геохимических барьеров, количеством и составом поступившей нефти, временем, прошедшим с момента загрязнения. Как правило, при формировании *первичной* аномалии загрязнения отмечается уменьшение концентрации техногенных углеводородов в почвах по мере удаления от места их выброса, но эта тенденция обычно нарушается воздействием на нефтяной поток латеральных барьеров, на которых возникают локальные максимумы концентрации поллютантов. С течением времени картина

еще более усложняется — происходит перестройка геохимической структуры первичных аномалий во *вторичные*, границы которых выходят за пределы первичного контура загрязнения. В результате рассеивания исходного загрязнения, внутрипочвенной трансформации нефтяных компонентов и неодинаковой скорости смещения нефтяных потоков на разных глубинах почв возможно возникновение *обращенных* аномалий, в которых максимальная концентрация нефтяных компонентов образуется на периферии ореола [15, 23, 24].

Протяженность ореолов нефтяного загрязнения, их геохимическая структура и контрастность содержания поллютантов в различных частях ореола являются функцией времени и характеризуются определенными отличительными чертами в различных природных условиях. Важную роль при изучении явлений миграции и аккумуляции нефтяных углеводородов играли специальные полевые эксперименты по внесению различных порций нефти или нефтепродуктов на поверхность и в толщу почвы. Опытные площадки закладывались в различных природных зонах (тундровой, таежной, степной, полупустынной), что позволяло моделировать контролируемый пространственно-временной эффект загрязнения территории нефтью, пластовыми водами и другими поллютантами.

Эти эксперименты показали, что в почвах мерзлотно-тундровых районов миграция нефти во многом контролируется глубиной и характером оттаивания мерзлого слоя, глеевым режимом почв,

тиксотропными явлениями. При этом сорбционный барьер в почвах (в первую очередь торфяные горизонты) регулирует радиальное перемещение поллютанта, а мерзлотный — латеральное. В целом для этих условий характерны наиболее контрастные ореолы нефтяного загрязнения, так как здесь замедлено разложение органических поллютантов, и в почвах присутствуют нефтеемкие органогенные горизонты, обеспечивающие захват и долговременное удержание больших масс загрязнителя.

Для таежно-лесных ландшафтов характерно большее разнообразие почвенно-геохимических условий миграции и аккумуляции нефти. В автономных подзолах и подзолистых почвах часто проявляются два максимума накопления поллютанта — у поверхности и в горизонте В. Нефть и нефтепродукты интенсивно и на значительные расстояния вымываются из почв водораздельных позиций, образуя в депрессиях рельефа ярко выраженные техногенно-природные аккумуляции, которые в свою очередь могут быть факторами формирования вторичных ореолов загрязнения в подземных и поверхностных водах.

Особенности поведения нефти в почвах и грунтах степных территорий выражаются в том, что она менее подвижна из-за непромывного водного режима; здесь происходит более интенсивное испарение летучих фракций и ускоренное разложение органической массы. На процесс образования ореолов нефтяного загрязнения в этих условиях влияет мощный гумусовый горизонт степных почв (черноземов и др.),

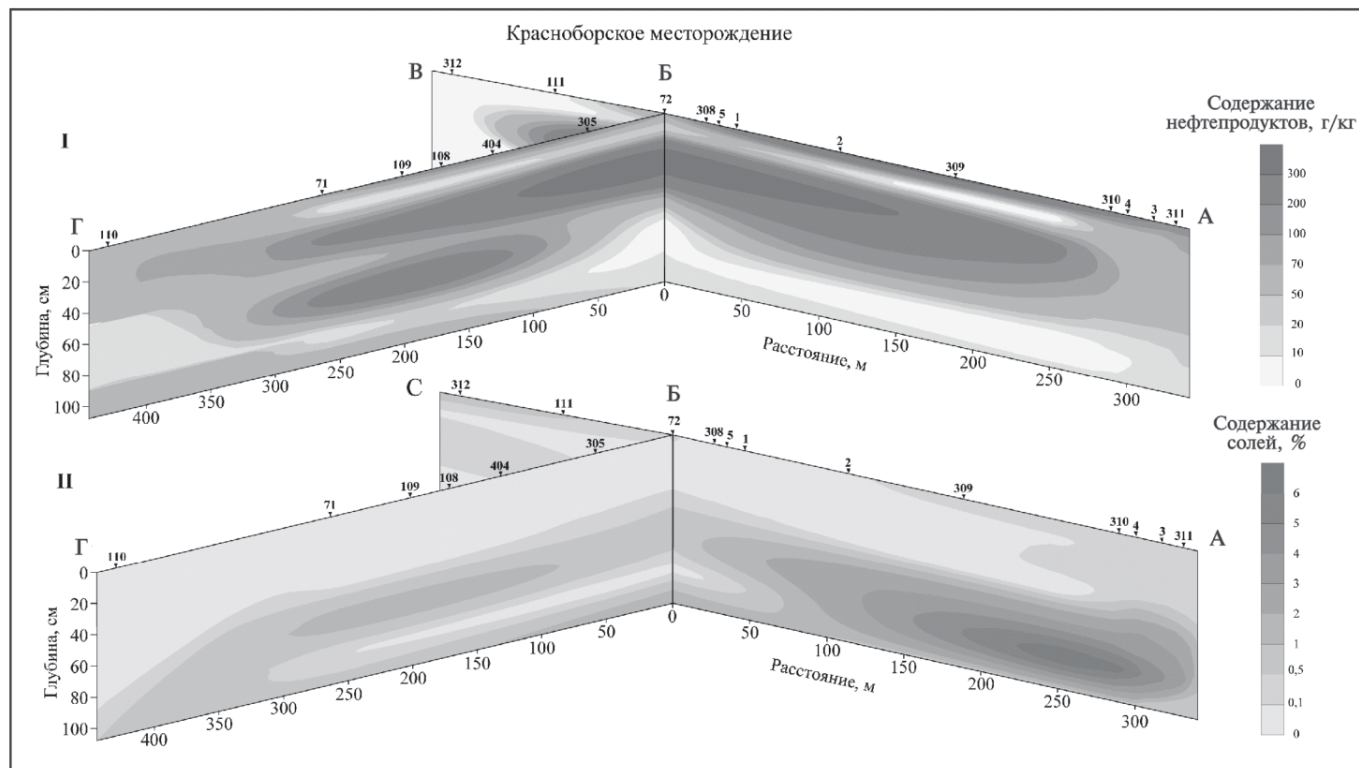


Рис. 2. Трехмерная графическая модель ореола нефтяного загрязнения, по [13]

который поглощает основную массу поллютанта из техногенного нефтяного потока и сокращает радиус его действия.

В полупустынных и пустынных районах важными факторами поведения нефти в ландшафтах оказываются, с одной стороны, ее малая подвижность, с другой — повышенный уровень интенсивности ее разложения, особенно в суперактивных почвах, где имеет место сочетание высокой температуры и достаточной влажности, а также высокий уровень ультрафиолетовой радиации. Нефть при поступлении на поверхность почвы концентрируется в самой верхней части почвенного профиля, в глубь почвы проникают только водорастворимые продукты трансформации углеводородов. При этом ореолы загрязнения характеризуются, как правило, малой протяженностью [13, 15, 23].

Результаты экспериментов были представлены в различной форме, в том числе в виде весьма информативных трехмерных моделей ореолов нефтяного загрязнения (рис. 2).

Важная составная часть изучения процессов трансформации техногенных углеводородов — *биоиндикационные исследования*. Для разных физико-географических районов страны установлены определенные виды-индикаторы нефтяного загрязнения и изучена динамика состава микрофлоры в нефтезагрязненных средах, что позволило охарактеризовать различные фазы техногенной трансформации последних с биотической точки зрения. В результате этих работ определены уровни содержания нефтепродуктов, критические для существования почвенных микроорганизмов [10] (рис. 3).

Совокупность полученных знаний — о сущности миграционных процессов в нефтезагрязненных ланд-

шафтных средах, о потенциальной нефтеемкости — нефтеотдаче почв и грунтов, о совместимости — несовместимости природных и техногенных потоков углеводородов — позволила создать ряд интегральных моделей поведения нефти в компонентах природной среды, которые послужили фундаментом для разработки научных подходов к решению ряда важных практических задач в области совершенствования экологического мониторинга, прогноза и нормирования (рис. 4).

Так, накопленные данные позволили обосновать систему экологических нормативов содержания нефтепродуктов в природных средах, прежде всего в почвах. Эта система включает: а) *верхний безопасный уровень концентрации* (ВБУК), при котором наступает ухудшение качества почвенной экосистемы; б) *верхний предел потенциала самоочищения* (ВППС), выше которого почва сама не может справиться с загрязнением; в) *ориентировочный уровень допустимой концентрации* (ОДК), при котором в данных природных условиях почва в течение года восстанавливает свою продуктивность, а негативные последствия для почвенного биоценоза самопроизвольно ликвидируются. В зависимости от приуроченности почвы к той или иной природной зоне, ее гранулометрического состава и позиции в ландшафтно-геохимическом сопряжении рекомендованы значения ОДК нефтепродуктов: в диапазоне 2000–8000 мг/кг почвы — для легких нефтепродуктов (бензин, керосин и др.) и в диапазоне 700–4000 мг/кг почвы — для тяжелых нефтепродуктов (нефть, мазут и др.). Этот подход базируется на осознании необходимости максимально учитывать широкий спектр физико-географических факторов, определяющих опасность углеводородного загрязнения ландшафта, и того, что нефть и нефтепродукты — это сложный комплекс различных компонентов, которые требуют дифференцированной оценки экологической угрозы от них [18].

Еще одна важная практическая задача, которую решали на основе полученных базовых представлений о характере миграции, аккумуляции и трансформации нефтяных поллютантов в природной среде, — установление источников нефтяного загрязнения компонентов ландшафта.

Индикация источников загрязнения природной среды и обеспечение эколого-геохимической безопасности при освоении нефтяных месторождений. Научное решение этих задач имеет важное производственное, экологическое и в определенной степени правовое значение, поскольку в ряде случаев связано с установлением юридической ответственности за экологические нарушения [3]. Отметим, что для идентификации источников загрязнения использовались сами поллютанты, так как их состав и свойства несут определенную информацию о происхождении и путях поступления данного вещества в окружающую среду.

Высоким информативным потенциалом в этом плане характеризуются полициклические ароматиче-



Рис. 3. Изменение соотношения экологических групп диатомовых водорослей дерново-подзолистых почв под влиянием загрязнения сырой нефтью, по [13]

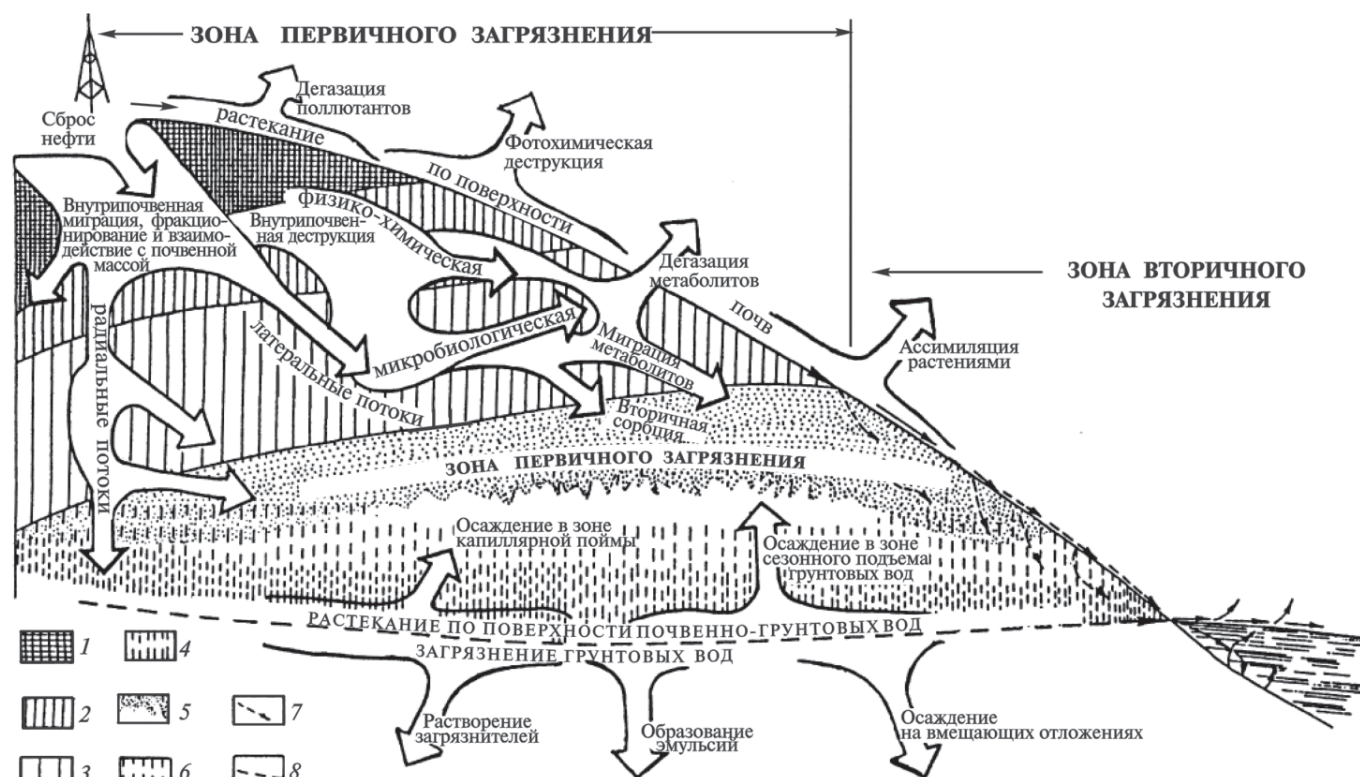


Рис. 4. Обобщенная модель поведения пластовых жидкостей (сырой нефти) в почвенных экосистемах, по [22]. Зоны загрязнения: 1 — преимущественного осаднения тяжелых фракций нефти; 2 — преимущественного осаднения легких фракций; 3 — преимущественного накопления минерализованных вод и легких фракций нефти; 4 — вод капиллярной каймы; 5 — вторичного внутрипочвенного загрязнения; 6 — сезонного подъема загрязненных почвенно-грунтовых вод; 7 — вторичные потоки загрязнителей; 8 — постоянный уровень почвенно-грунтовых вод

ские углеводороды (ПАУ) — органические соединения, представленные множеством различных индивидуальных структур и отличающиеся особенностями строения молекулы. ПАУ входят в состав нефтей, нефтепродуктов и битумов, и имеют различное — техногенное или природное — происхождение. В процессе исследований выделены различные специфические ассоциации ПАУ, которые характеризуют те или иные источники загрязнения — нефтепереработку, нефтедобычу, производство кокса, работу двигателей внутреннего сгорания и т.д. Установлена, например, связь тех или иных ассоциаций ПАУ с различными типами территории Москвы — с промышленными зонами, жилыми районами, участками дорог с бензоколонками, с лесопарками (табл. 1) [4, 11, 27].

Для идентификации источников и оценки уровня загрязнения ПАУ окружающей среды проводится площадное обследование территории с опробованием почв, снега, поверхностных вод, растительных остатков. По соотношению ассоциаций ПАУ в различных средах (в данном случае — в фоновых и загрязненных почвах, в детрите, в атмосферных выпадениях) можно сделать выводы об источниках загрязнения, темпе аккумуляции или деструкции поллютантов, о способности ландшафтов к самоочищению от них [5].

В настоящее время разрабатывается еще более информативный подход к индикаторной диагностике источников и форм нефтяного загрязнения,

основанный на оценке комплексного углеводородного состояния компонентов ландшафта — почв, грунтов, донных отложений, для чего в этих средах определяется соотношение концентрации углеводородных газов, битумоидов и индивидуальных соединений типа ПАУ. Территориальная совокупность однородных углеводородных состояний, выявленных в том или ином компоненте природной среды, образует углеводородное геохимическое поле [16, 17].

Примером апробации этого подхода может служить исследование, направленное на идентификацию источников загрязнения на одном из нефтяных промыслов Прикамья, где по днищам речной долины было выявлено нефтяное загрязнение неясного генезиса. При этом на водораздельных поверхностях, где расположены буровые участки, имели место локальные нефтяные разливы, но на склонах долины, в зоне предполагаемых путей латеральной миграции поллютанта, поверхностное загрязнение практически не обнаружено.

При первичном обследовании территории было обращено внимание на то, что в ее пределах развит карстовый рельеф, который мог вызывать ускоренную фильтрацию загрязняющих веществ в карстовые полости, образование подземных техногенных скоплений нефти и вторичный выход ее на поверхность в днище долины, минуя поверхность склонов.

Таблица 1

Типы и характеристика углеводородных геохимических полей в почвах техногенных городских ландшафтов в восточных, южных и центральных районах г. Москвы, по [11]

Тип углеводородного геохимического поля, источник углеводородов	Почвы	Содержание (г/кг) и тип битумоида	Содержание (мг/кг) и тип ассоциации ПАУ
Атмоседиментационный рассеянный, аэрозоли отходов промышленности, энергетики и транспорта при отсутствии импактных источников загрязнения	Урбо-дерново-подзолистые, урбо-дерновые лесопарковых и селитебных зон города	Низкое (0,2–1,0), легкий углеводородный и маслянистый	Повышенное (0,3–1), пиреновый
Атмоседиментационный импактный, импактное аэрозольное загрязнение технологическими отходами предприятий промышленности, энергетики и транспорта	Урбаноземы промышленных и селитебных зон города	Низкое (0,2–1,0), смолистый	Высокое (1–10), бенз(а)пиреновый
Инъекционный нефтепродуктный, подновленный, импактное загрязнение нефтепродуктами и отходами городского транспорта		Повышенное (1–5), маслянисто-смолистый	Очень высокое (более 10) бенз(ghi)периленовый
Инъекционно-седиментационный, импактное загрязнение нефтепродуктами с наложенным аэрозольным загрязнением		Высокое (5–25), смолистый	Очень высокое (>25), бенз(а)пирен-бенз(ghi)периленовый

В связи с этим было изучено углеводородное состояние почв и донных наносов в районе нефтяного промысла по сравнению с фоновыми участками. В результате выявлены следующие диагностические углеводородные поля на исследованной территории: 1) *фоновое биогеохимическое поле* — проявляется в почвах низкой концентрацией газообразных углеводородов, главным образом метана, битумоидов и полициклических ароматических углеводородов; источником углеводородов служат липидные компоненты гумуса или торфа; 2) *глубинно-эманационное поле* — характеризуется существенным повышением в почвах содержания газообразных углеводородов (метана) при сохранении фоновых концентраций битумоидов и ПАУ и преобладании в составе полиаренов легких низкоконденсированных соединений; возникает под воздействием газовых потоков от нефтяной залежи на почвенный покров; 3) *инъекционное поле* — диагностируется по высокому газосодержанию и концентрации ПАУ, характеризуется значительным количеством битуминозных веществ маслянисто-смолистого типа, образуется в результате поверхностных разливов нефти и нефтепродуктов; по интенсивности газопроявления подразделяется на слабодеградированное (свежее) и сильнодеградированное (старое); 4) *субповерхностно-эманационное поле* — выявляется в почвах по повышенной концентрации тяжелых углеводородов в почвенном воздухе, особенно в наиболее глубоких горизонтах, при повышенном количестве битумоидов и ПАУ и увеличении их содержания в самой нижней части почвенного профиля; формируется в результате воздействия на почвы газовых эманаций от нефтяных масс, которые скапливаются в полостях горных пород из-за утечки сырья при его добыче [17].

Таким образом, углеводородные геохимические поля служат индикаторами каналов и генезиса углеводородных потоков, возникающих при добыче нефти.

Другой пример идентификации источника загрязнения связан с проблемой эколого-геохимической оценки условий открытого хранения комовой серы, которая накапливается в большом количестве в виде побочного продукта при очистке высокосернистой нефти. Речь идет о части территории Западного Казахстана, где ведется разработка Тенгизского нефтяного месторождения.

Для оценки вероятности воздействия серных блоков на окружающую среду были заложены разноразмерные трансекты и по ним опробованы компоненты ландшафта (главным образом почвы и воды). Определялись различные формы серы и их количественные соотношения. Поскольку район исследования находится в аридной области, то возникла проблема отделения природной серы, естественным образом накапливающейся в почвенном покрове, от техногенной, которая могла быть принесена с серных блоков. Для этого были проведены анализы на содержание в почвах и водах изотопов ^{32}S и ^{34}S , определенные соотношения которых маркируют, условно говоря, «глубинную нефтяную» и «ландшафтную» серу. С целью совершенствования системы экологически безопасного хранения серы на открытых площадках проведены полевые, камеральные и аналитические работы по выявлению текущего состояния серных блоков. Для оценки качества природной среды и планирования природоохранных мер на участках, непосредственно прилегающих к площадкам хранения, составлены детальные эколого-геохимические карты. Кроме того, изучен зарубежный опыт, в частности, система мониторинга окружающей среды и технология экологически безопасного содержания открытых хранилищ серы в канадской провинции Альберта.

Прогноз эколого-геохимического состояния и устойчивости ландшафтов в районах добычи и переработки нефти. Важнейшие условия обеспечения экологической безопасности при добыче, переработке и транспортировке углеводородов — анализ устойчивости и