

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ВИНИТИ РАН)

ПРОБЛЕМЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Обзорная информация

Выпуск № 2

Издается с 1972 г.

Москва 2020

Выходит 12 раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – к.т.н. И. И. Потапов

Члены редколлегии:

*И. Н. Борисенко, Е. В. Карцева,
к. х. н. Л. М. Королёва, д. ф.-м. н. В. Ф. Крапивин,
к. т. н. Г. Ю. Остаева (ученый секретарь),
к. т. н. А. Г. Юдин*

Наш адрес: 125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, 20
Всероссийский институт научной и технической информации
Отдел научной информации по глобальным проблемам
Телефон 8(499) 152-55-00; Факс 8(499) 943-00-60
E-mail: ipotapov37@mail.ru

© ВИНТИ, 2020

THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
THE ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE FOR SCIENTIFIC AND TECHNICAL
INFORMATION
(VINITI RAS)

PROBLEMS OF ENVIRONMENT AND NATURAL RESOURCES

Review information

№ 2

Founded in 1972

Moscow 2020

A Monthly Journal

CHIEF EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
Potapov I. I.

Editorial Board Members:

*Borisenko I. N., Kartseva E. V., Koroleva L. M.,
Krapivin V. F., Ostaeva G. Y., Yudin A. G.*

Editorial office: 125190, Russia, Moscow, Usiyevich st., 20
The All-Russian Research Institute for Scientific and Technical Information
Department of Scientific Information on Global Problems
Telephone: 499-152-55-00
ipotapov37@mail.ru

© VINITI, 2020

ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-02-1

УДК 502/504:502.1

ГЛОБАЛИЗАЦИЯ И КЛИМАТ

Канд. техн. наук **И.И. Потапов**

Всероссийский институт научной и технической информации, Москва,
ipotapov37@mail.ru

GLOBALIZATION AND CLIMATE

I.I. Potapov

Ключевые слова: глобализация, климат, общество, принятие решений, ресурсы.

Key words: globalization, climate, society, decision making, resources.

Обсуждены проблемы достижения устойчивого взаимодействия общества с глобальной окружающей средой. Отмечено нарастание негативных процессов в системе климат-биосфера с увеличением антропогенной нагрузки. Отмечено наличие противоречия между обществом и природой, для урегулирования которого требуется развитие эффективных средств и механизмов принятия решений на региональных и глобальных уровнях с учетом социальных, экономических, политических и демографических процессов. Указаны наиболее важные проблемы исследования окружающей среды и перечислены конкретные направления дальнейших экологических разработок.

The problems of sustainable development of interactions between society and nature are discussed. Increase of negative processes in the climate-nature-society system is marked as consequences of anthropogenic processes. Existence of the conflicts between society and nature is noted the overcoming of which needs the development of effective tools and mechanisms for decision making on regional and global scales taking into consideration of social, economic, political and demographic processes. The most important problems are shown to be as subjects for the environment investigations and specific future directions for the ecological studies are enumerated.

Введение

С развитием цивилизации все более актуальной становится проблема прогнозирования масштабности ожидаемых изменений климата и связанного с ним изменением среды обитания человека [1-19]. В первую очередь речь идет о возникновении и распространении нежелательных природных явлений, приводящих к гибели живых существ и причиняющих человеку масштабные экономические ущербы. Такие явления получили название природных катастроф. К природным катастрофам относятся наводнения, засухи, ураганы, штормы, торнадо, цунами, извержения вулканов, оползни, обвалы, сели, снежные лавины, землетрясения, лесные пожары, пылевые бури, сильные морозы, жара, эпидемии, нашествия са-

ранчи и многие другие природные явления. Возникновение многих из них в значительной степени имеет антропогенный характер, но интенсивность и частота зависят от показателей изменчивости климата.

Известно, что в историческом плане природные аномалии различного пространственного и временного масштабов играли определенную роль в эволюции природы, вызывая и активизируя механизмы регуляции природных систем. С развитием промышленности и возрастанием плотности населения эти механизмы претерпели значительные изменения и приобрели угрожающий жизни характер. Это в первую очередь связано с нарастанием и распространением амплитуды антропогенных возмущений в окружающей среде. Многочисленные исследования возникающих здесь проблем, проведенные за прошедшие десятилетия, показали, что частота катастрофических явлений в природе и их масштабность непрерывно нарастают, приводя к возрастанию риска больших потерь в экономике и человеческих жизней, а также к нарушениям социальной инфраструктуры [11,12].

Показатели потерь при возникновении чрезвычайных природных явлений во многом зависят от готовности территории к сокращению риска потерь и существенно изменяются во времени. Наибольшие потери вызывают наводнения и ураганы. Неоднородно также распределение катастроф и в пространстве. Природные катастрофы всегда выступали как регулятор процессов эволюции. Но усиление роли человека в их возникновении поставило вопрос о сохранении стабилизирующей роли этого регулятора в будущем. Поэтому восстановление уже подвергшейся существенным возмущающим воздействиям биосферы и поддержание ее в состоянии, обеспечивающем устойчивое развитие, в настоящее время становится главной целью человечества. Это подтвердилось на Всемирном климатическом саммите (COP 21) в Париже в 2015 г. Имеющаяся с момента принятия в 1997 г. Протокола Киото противоречивость проблемы здесь проявилась особо остро в связи с тем, что сокращение выбросов парниковых газов по-прежнему ведет к закрытию промышленных предприятий, что особенно неприемлемо для развивающихся стран.

Привлекающим в настоящее время большое внимание к проблемам глобализации и устойчивого развития посвящена обширная научная литература (приведенный список литературы иллюстрирует лишь небольшую часть существующих публикаций). Еще более многочисленны выступления в средствах массовой информации. Однако, несмотря на это, обсуждение рассматриваемой проблематики содержит много противоречий и недоговоренностей. Прежде всего, вызывает недоумение, что проблемы глобализации и устойчивого развития (УР) трактуются, как правило, как существующие отдельно и независимо. Между тем, не вызывает сомнений приоритет проблемы глобализации и подчиненное значение вопросов УР как одного из важнейших аспектов процессов глобализации. При этом понятие глобализации включает не только социально-экономические аспекты, но во многом связано с глобальными проблемами эволюции системы биосфера-климат-общество (СБКО). И в первую очередь наиболее актуальной является причинная связь изменения климата и роли отдельных биомов в этом изменении, включая леса, вечную мерзлоту и водные экосистемы [17].

Согласно Kавous [8] не существует единого взгляда на понятие глобализации. Отсюда следуют и различные подходы к принятию решений в области природопользования. Однако существуют общие формальные показатели глобальных изменений, такие как концентрация CO_2 в атмосфере (400,57 ppm), повышение средней глобальной температуры (на 1,4°C с 1880 г.), сокращение площади арк-

тического льда (на 13,3% за последние 10 лет), повышение уровня Мирового океана (на 3,22 мм в год), сокращение площади лесов (на 1,5 млн км²) и другие глобальные изменения. Некоторые из них объясняются ростом численности населения (более 7,7 млрд человек в 2016 г.). Несмотря на имеющиеся в литературе дискуссии о причинах и следствиях глобальных изменений очевидным является противоречие между обществом и природой, для урегулирования которого требуется развитие эффективных средств и механизмов принятия решений на региональных и глобальных уровнях с учетом социальных, экономических, политических и демографических процессов. Важно понимание того, что среда обитания населения Земли ограничена по пространству и ресурсам. Речь, в конечном счете, идет о выживании всего человечества [10].

Суммируя, отметим наиболее важные текущие проблемы исследования окружающей среды.

- *Глобальное потепление.* Потепление климата вызывает повышение температуры океанов и поверхности суши, что сопровождается таянием полярных льдов, повышением уровня Мирового океана и изменением режима осадков, сопровождаемого мгновенно возникающими наводнениями, интенсивными снегопадами или опустыниванием.

- *Изменение климата.* Этот процесс имеет пространственное распределение изменений температуры атмосферы, как средней по регионам, так и во времени. Наличие множества прямых и обратных связей в системе атмосфера-океан-суша-общество делает задачу оценки этих изменений и выявления их главных причин достаточно сложной. Сосредоточение на выбросах парниковых газов не дает однозначного решения этой задачи.

- *Загрязнение.* Загрязняются практически все элементы окружающей среды: воздух, вода и почва. Многообразие загрязнителей расширяется с каждым годом в связи с развитием промышленности и других отраслей обеспечения жизненного пространства населения планеты.

- *Истощение природных ресурсов.* Человечество использует каменный уголь, нефть и природный газ. Их запасы ограничены и истощаются. Переход на возобновимые ресурсы типа солнечной, геотермальной и ветровой энергии, а также биоэнергии требует больших экономических вложений для развития необходимых технологий генерации и использования такой энергии.

- *Управление отходами.* Поступление отходов деятельности человека в окружающую среду является одним из элементов глобального кризиса. Многообразие отходов увеличивается с каждым годом. Особо опасными являются радионуклиды, тяжелые металлы, органические вещества, углеводороды нефти, различные химические вещества. Сокращение отходов и их переработка являются насущными проблемами современного общества, желающего сохранить окружающую среду в приемлемом для жизни качестве.

- *Перенаселение.* Непрерывный рост численности населения планеты ставит проблему обеспечения водой, пищей и топливом. Ясно, что между этими категориями существует ситуация достижения неравновесного состояния. Важно определить время его наступления. Это может быть достигнуто с помощью глобальной модели системы природа-общество (ГМСПО).

- *Увеличение количества городов.* С увеличением численности населения наблюдается рост количества городов, что способствует деградации наземных экосистем и сокращению территорий с природными экосистемами.

- *Генетическая промышленность.* Основная проблема состоит в том, что в последние десятилетия наблюдается расширение генетической модификации пищи с помощью применения различных биотехнологий. На этом пути могут возникнуть необратимые процессы изменения флоры и фауны без имеющихся на данный момент оценок последствий глобального масштаба.

- *Загрязнение воды.* Водный ресурс планеты является одним из элементов выживания человечества, но он постепенно уничтожается не только путем потребления, но и загрязнения токсичными веществами. По оценкам многих экспертов человечеству срочно необходимо принять конструктивные меры по охране водных ресурсов.

- *Кислотные дожди.* Кислотные дожди возникают из-за загрязнения атмосферы окислами серы и азота, приводя к резкому сокращению продуктивности как природных, так и сельскохозяйственных растений. Как результат сокращается объем пищи и возрастает опасность заболеваний различного типа.

- *Окисление океана.* Эта проблема напрямую связана с обменом CO₂ между атмосферой и океаном, что влияет на изменение глобального климата.

- *Истощение озонового слоя.* Токсические газы CFC (Chloro-floro carbons), запрещенные, но тем не менее выбрасываемые в атмосферу промышленностью, при достижении верхней атмосферы уничтожают озоновый слой и создают в нем так называемые озоновые дыры, через которые беспрепятственно проникают ультрафиолетовые лучи. Это одна из весьма важных проблем охраны окружающей среды.

- *Здоровье населения.* Критические ситуации в окружающей среде, выражающиеся в ее изменении под влиянием человека, повышают риск для здоровья населения и животных. Качество пищи, воды и воздуха напрямую влияет на здоровье живых существ, что может быть четким индикатором состояния окружающей среды.

- *Потеря биоразнообразия.* Активность населения ведет к исчезновению видов и сред обитания. Экосистемы, которые образовывались миллионы лет, чтобы иметь высокий уровень выживания и приспособленности, в настоящее время находятся в состоянии стресса, так как любой их элемент подвергается опасности быть уничтоженным или измененным. Таких примеров множество, например, коралловые рифы, поддерживающие жизнь в океане, непрерывно уничтожаются.

- *Обезлесивание.* Леса играют важную роль в стабилизации климата как стоки углекислого газа. В настоящее время около 30% лесных территорий занято другими экосистемами и этот процесс продолжается. Должен быть найден баланс между рисками резкого изменения климата и экономическими потребностями человечества.

Все, перечисленные выше категории, безусловно, формируют условия выживания населения планеты. Конечно, каждая из этих категорий имеет определенный вес в конкретном регионе. Например, обеспечение качественной питьевой водой становится актуальным практически во всех регионах земного шара [13]. Для некоторых регионов, особенно в Африке, риски нарушения снабжения питьевой водой населения особенно высоки. Следует обратить внимание на другую не менее актуальную категорию – безопасность обеспечения пищей, что является глобальной проблемой выживания человечества. Несмотря на имеющийся рост производства пищи один из семи жителей планеты сегодня получает недостаточное количество протеина и энергии от потребляемой пищи. Ясно, что тренды в демографической динамике и изменениях климата создают неопределенности в

вопросах оптимизации сельскохозяйственных экосистем. Все это затрудняет корректировку региональных стратегий природопользования как регуляторов окружающей среды.

Хронология переговоров по глобальному климату в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, начиная с 1972 г. в Стокгольме и кончая 2015 г. в Париже, показывает весьма скромные успехи. Все 196 стран-участниц глобального саммита по климату в Париже утвердили новое рамочное соглашение ООН, определяющее нормы выбросов парниковых газов после 2020 г. и меры по предотвращению изменения климата. Вопрос состоит в реальном воплощении этого соглашения, что оказывается проблемой из-за споров о глобальном потеплении.

Глобализация и устойчивое развитие

Хотя понятие глобализации появилось в работах французских и американских специалистов лишь в 60-х годах двадцатого века, процессы глобализации, строго говоря, начались в самом начале голоцена (10-15 тыс. лет тому назад), когда сформировался новый вид *homo sapiens*, который сразу стал характеризоваться стремлением к территориальной экспансии и к выходу за пределы своей экологической ниши (эти процессы были убедительно проанализированы Горшковым и др. [1,2]. Held и McGrew [6,7] справедливо отметили, однако, что до сих пор «...не существует – что весьма удивительно – ни убедительной теории глобализации, ни даже систематического анализа ее главных особенностей». Held и McGrew [6] поставили перед собой задачу ответить на следующие вопросы:

- Что такое глобализация? Как она должна быть выражена концептуально?
- Представляет ли собою современная глобализация некое новое состояние?
- С чем ассоциируется глобализация: с гибелью, возрождением или изменением государственной власти?
- Устанавливает ли современная глобализация новые ограничения в политике? Каким образом можно ввести глобализацию в рамки «цивилизации» и демократии?

При этом отмечено, что «Для начала глобализацию можно представить как процесс расширения, углубления и ускорения мирового сотрудничества, затрагивающий все аспекты современной социальной жизни – от культурной до криминальной, от финансовой до духовной». Held и McGrew [6,7] выделили и проанализировали результаты разработок, осуществленных тремя школами, названными гиперглобалистами, скептиками и трансформистами, специфически относящихся к анализу процессов глобализации.

Held и McGrew [6,7] подчеркнули, что «Глобализация, как старались мы доказать, не является ни чем-то уникальным, ни линейным процессом. Более того, лучше всего представлять ее себе как чрезвычайно дифференцированное явление, в состав которого входят такие разные сферы деятельности и сотрудничества, как политическая, военная, экономическая, культурная, миграционная и экологическая». «Политические, военные, экономические и культурные области и сферы труда, миграционных перемещений и экологии – вот те основные зоны действия власти, которые составят предмет нашего дальнейшего исследования».

Остановимся более подробно на анализе понятия глобализации, которое составляет основу монографии [7]. Наиболее глубокое понимание глобализации дает представление о ней как о процессе или ряде процессов, а не каком-то уникальном состоянии. Она не является результатом упрощенной логики линейного

развития, так же как не служит и прототипом всемирного общества или мирового сообщества. Скорее, глобализация означает возникновение межрегиональных структур и систем взаимодействия и обмена. В этом отношении подключение национальных и социальных систем к более широким глобальным процессам следует четко отличать от глобального объединения, как бы оно ни понималось [3].

Пространственный охват и плотность глобальных и межнациональных взаимосвязей образуют сложные паутины и структуры отношений между сообществами, государствами, международными учреждениями, неправительственными организациями и многонациональными корпорациями, которые образуют глобальный порядок. Эти частично совпадающие и взаимодействующие структуры определяют пути развития сообществ, государств и социальных сил, которые одновременно и принуждают их, и наделяют полномочиями. В этом отношении глобализация родственна процессу структуризации, поскольку она является продуктом, как индивидуальных действий, так и совокупных взаимодействий между бесчисленными исполнителями и учреждениями, разбросанными по всему земному шару. Глобализация связана с развивающейся динамической глобальной структурой, предоставляющей возможности и налагающей ограничения. Но это также и строго стратифицированная структура, так как процесс глобализации происходит крайне неравномерно: он учитывает существующие модели неравенства и иерархии и в то же время создает новые правила включения и исключения, новые представления о победителях и проигравших. Таким образом, глобализацию можно понимать как воплощение процессов структурирования и стратификации [4].

Немногие области общественной жизни остались незатронутыми процессами глобализации. Эти процессы нашли свое отражение во всех социальных сферах: культурной, экономической, политической, законодательной, военной – вплоть до экологической. Наиболее адекватным является понимание глобализации как многоаспектного или дифференцированного социального феномена, который надо понимать не как некое уникальное состояние, а как нечто связанное с моделями усиливающихся глобальных взаимосвязей во всех ключевых областях социальной деятельности. Следовательно, чтобы понять динамику и последствия глобализации, необходимо какое-то знание о разных моделях глобальных взаимосвязей в каждой из этих областей. Например, модели глобальной экологической взаимозависимости радикальным образом отличаются от моделей культурного или военного глобального взаимодействия. Любая общая концепция процессов глобализации должна исходить из того, что глобализацию лучше представлять себе не в виде какого-то уникального состояния, а в форме дифференцированного и многопланового процесса.

Поскольку глобализация отменяет и нарушает политические границы, она ассоциируется с разрушением и перераспределением территориальности социально-экономического и политического пространства. А так как экономическая, социальная и политическая активность все в большей степени «распространяется» по земному шару, она уже неспособна организовываться только по территориальному принципу. Каждая такая активность может быть укоренена в тех или иных регионах, но территориально не закреплена. В условиях глобализации «локальное», «национальное» и даже «континентальное» пространство (политическое, социальное и экономическое) перестраивается так, что уже не обязательно совпадет с юридически закрепленными территориальными границами. С другой стороны, по мере того как глобализация усиливается, она все больше – стимули-

рует социально-экономическую активность, не связанную с определенной территорией, путем создания субнациональных, региональных и вненациональных экономических зон, механизмов управления и культурных комплексов, что также может усиливать «локализацию» и «национализацию» обществ. Соответственно, глобализация включает в себя элементы разрушения и перераспределения территориальных границ политической и экономической власти. В этом отношении ее лучше всего описывать как процесс вне территориальный.

Беспрецедентно возросший интерес к проблемам глобализации определяется их несомненной актуальностью и остротой. Хотя до сих пор отсутствует общепринятое определение понятия «глобализация», ясно, что речь идет об изменениях в глобальном масштабе, которые касаются состояния взаимоотношений человека и природы, динамики научно-технического прогресса (особенно в области информатики и коммуникаций), социально-экономического развития и таких его аспектов, как международная торговля, финансы и др. Существующие в настоящее время оценки современного состояния цивилизации весьма противоречивы из-за несовместимости трех проблем: нищета, глобальное потепление климата и распространение оружия. Сопровождающие явления этих трех проблем оказываются неразрешимыми как на региональном, так и на глобальном уровнях. При этом повышенное внимание к проблеме «глобального потепления» сопровождается целым рядом конъюнктурных обстоятельств, относящихся к областям политики и экономики [15].

Так или иначе, глобализация напрямую связана с устойчивым развитием системы природа-климат-общество. Индикаторами устойчивого развития являются показатели состояния природной среды, экономики и общества. Объединяющим началом для проблем глобализации и устойчивого развития служит глобальная экодинамика. Проблемы глобальной экодинамики (изменений в системе «природа - общество» в глобальных масштабах) привлекают всевозрастающее внимание [11,12]. Цель соответствующих разработок состоит в оценках изменений в системе «природа - общество» (СПО), происходивших в прошлом, наблюдаемых в настоящее время и возможных в будущем. Даже оценки современной экологической ситуации являются более чем противоречивыми, варьируя в диапазоне от обоснования благополучия (как это сделано, например, в нашумевшей монографии Lomborg [14] до выводов об угрожающей миру экологической катастрофе (подобные суждений наиболее популярны, особенно в средствах массовой информации). Иллюстрируя апокалиптические прогнозы, Lomborg подобрал целую коллекцию экологических «молебнов» (litany), к числу которых относятся, например, такие высказывания: «...уже более 40 лет Земля посылает нам сигналы “бедствия”» (журнал Time). Пожалуй, наиболее ярким случаем, несомненно политически мотивированного «экологического экстремизма», является заявление сэра David King, советника по науке премьер-министра Великобритании, согласно которому изменения климата представляют собой более грозную глобальную опасность, чем терроризм.

К числу главных приоритетов исследований динамики СПО принадлежат:

- концептуальный и аналитический подходы к изучению взаимосвязей в системе природа - общество;
- выявление взаимосвязей проблем окружающей среды и социально-экономического развития с экологической политикой;
- установление взаимосвязей между уже происходящими и возможными в ближайшем будущем изменениями окружающей среды;

- обоснование таких средств, которые могут быть использованы для изучения упомянутых взаимосвязей;

- обеспечение комплексного выполнения обязательств при соблюдении законов международного экологического права в национальных программах, посвященных всем направлениям разработок;

- выявление пробелов в научных разработках и оценках.

Реализация перечисленных основных принципов должна быть выполнена с учетом следующих четырех общих требований:

- 1) согласование научных разработок, экологической политики и их осуществления;

- 2) учет взаимосвязи экодинамики и социально-экономического развития;

- 3) рассмотрение специфики процессов в различных пространственных масштабах;

- 4) отображение специфики процессов в различных временных масштабах.

Основопологающим обстоятельством является необходимость учета взаимосвязанности ключевых проблем экодинамики, определяемая наличием большого числа обратных связей в СПО и нелинейности, за счет которой могут возникать «пороговые эффекты», а также синергизма технологий и экологической политики. Многочисленные иллюстрации актуальности учета различной взаимосвязанности содержит проблематика глобальных изменений климата.

Адекватный анализ роли обратных связей и нелинейности СПО серьезно осложняет фрагментарность имеющейся информации. В этой связи вызывает огорчение то обстоятельство, что до сих пор не получила должного признания разработанная в России концепция биотической регуляции окружающей среды [1,2], которая могла бы составить концептуальную основу для решения проблем глобальной экодинамики. К сожалению, концепция биотической регуляции остается «незамеченной» в международных институтах, иллюстрацией чего является, в частности, недавняя полемика по поводу концепции «Гайя» (Kerr, 2005).

Концепция биотической регуляции опирается на следующие выводы.

1. Земля представляет собой уникальную планету Солнечной системы, поскольку на этой планете существует жизнь в форме биоты - совокупности всех живых организмов, включая человека. Важные свойства жизни включают: биологическую устойчивость видов и их сообществ, а также очень жесткое распределение потоков энергии, поглощаемой биотой, по организмам различных размеров. Биота ответственна за формирование свойств окружающей среды и их устойчивости в соответствии с потребностями биоты. Только по этой причине стало возможным долговременное существование биоты на Земле на основе принципа биотической регуляции. Поддержание устойчивости окружающей среды является одной из главных целей всех живых организмов.

2. Подобно множеству других видов, *Homo sapiens* является одним из видов биоты и поэтому его важная задача также состоит в поддержании стабильности глобальной биосферы. В противном случае устойчивое развитие было бы невозможным. Человек покинул его природную экологическую нишу и стал потреблять значительно больше ресурсов биосферы, чем это допускают требования экологического равновесия. После начала промышленной революции подобный процесс нарушения природного равновесия непрерывно ускорялся в условиях быстрого роста численности населения.

3. Приближенные оценки показали, что для обеспечения устойчивого состояния биосферы допустимо использование не более 1% ее ресурсов. В настоящее

время эта доля близка к 10%. Похожая ситуация существует и в отношении эволюции глобальных биогеохимических круговоротов вещества. Так, например, замкнутость глобального круговорота углерода до начала промышленной революции была близка к 0,01% (большую роль в установлении устойчивого состояния биосферы имело биоразнообразие). К настоящему времени произошел спад замкнутости до 0,1% и становится все более ощутимой угрозой глобальной экологической катастрофы.

Таким образом, необходимо рассматривать биосферу не как ресурс, но как фундаментальное условие продолжения жизни на Земле. В настоящее время главной целью должно стать восстановление уже подвергшейся существенным возмущающим воздействиям биосферы и поддержание ее в состоянии, обеспечивающем устойчивое развитие.

Трудная проблема состоит, однако, в наличии многих недостаточно изученных аспектов динамики биосферы. Решающая роль принадлежит в этом контексте созданию адекватных систем наблюдений и дальнейшему совершенствованию методов численного моделирования. Первая из этих проблем особенно актуальна, поскольку до сих пор адекватная система мониторинга глобальных изменений не только не существует, но даже и не обоснована концептуально.

4. Критически важная особенность развития современной цивилизации состоит в существовании неравенства между промышленно развитыми и развивающимися странами, которое проявляется, прежде всего, в неэквивалентном использовании существующих ресурсов. Душевое потребление «золотого миллиарда» несравнимо выше, чем для остальной части мира. Необходимо поэтому достичь соглашения о новом социальном порядке, основанном на соглашении о сотрудничестве и партнерстве. Осуществление адекватных систем жизнеобеспечения возможно лишь на базе соответствующих международных соглашений.

5. Становится все более ясным, что современная система рыночной экономики не обеспечивает перехода от неустойчивой к устойчивой траектории развития. Соответствующие усилия, предпринимаемые в таких областях, как образование, законодательство и менеджмент, нельзя признать достаточными. Более конструктивную роль могут играть неправительственные и религиозные организации.

6. Для стимулирования перехода к устойчивому развитию необходимо комплексное осуществление целого ряда мер, основанных на понимании сложности современной ситуации. Крайне важно осознание того обстоятельства, что дальнейшее развитие общества потребления приведет к глобальной экологической катастрофе и коллапсу цивилизации. Единственное решение проблемы состоит в отказе от традиционной парадигмы общества потребления и в радикальном изменении образа жизни на основе признания приоритетов духовных ценностей. Для преодоления социальных контрастов «Север - Юг» необходимы срочные меры по оказанию помощи развивающимся странам на основе осуществления ранее принятых рекомендаций ООН.

Именно концепция биотической регуляции должна составлять основу главного приоритета программы ЮНЕП (UNEP, 2004), который определен как взаимодействия между человеком и окружающей средой: концептуальный подход к анализу взаимосвязей. Эту проблему предлагается решать с применением разработанной ЮНЕП концептуальной модели DPIR (Drivers, Pressures, Impact, Response), описывающей причинно-следственные связи между экологическим и социально-экономическим компонентами СПО. Обнадеживающим фактором является Программа ООН по окружающей среде, в которой выделены такие при-

оритеты, как изменение климата, бедствия и конфликты, регулирование экосистем, экологическое руководство, химические вещества и отходы, ресурсоэффективность [5].

К числу отдельных конкретных направлений экологических разработок относятся:

1. *Природные и антропогенно обусловленные изменения окружающей среды.* В этом контексте ключевое значение имеет системная классификация и приоритизация взаимосвязей между природными и антропогенными изменениями окружающей среды (стоит подчеркнуть, что нерешенность подобной проблемы является одной из главных причин крайней противоречивости существующих выводов относительно природы современных глобальных изменений климата. В программном документе ЮНЕП справедливо подчеркнута первостепенная актуальность проблематики биогеохимических взаимодействий и круговоротов (даже в случае круговорота углерода мы все еще далеки от адекватного понимания наиболее существенных механизмов его формирования).

2. *Экологические факторы и благосостояние человека.* Требуют внимания экологические факторы как позитивного, так и негативного характера. К числу первых относятся экосистемы, выполняющие функции жизнеобеспечения (вода, пища, рекреации и многое другое), а ко второй категории принадлежат, в частности, различные факторы экологического стресса (болезни, вредители сельского хозяйства, природные бедствия и др.).

3. *Антропогенные воздействия на окружающую среду.* В этой связи особый интерес представляет анализ демографической динамики и условий социально-экономического развития. Также важно оценить и сбалансировать возможные потенциалы для снижения негативных воздействия на природную среду за счет производства пищи и других средств существования человека.

4. *Экологическая политика и ее взаимосвязи с экодинамикой.* Имеется в виду использование технологий, институциональные меры и управление риском. Отдельное место занимают проблемы взаимодействия науки и экологической политики.

Что касается конкретных факторов экодинамики, то в программе UNEP (2004) справедливо подчеркнута приоритетное значение анализа и оценки роли взаимосвязей между такими, например, проблемами, как биоразнообразие, изменения климата, деградация плодородия почв, пресная вода, прибрежная и морская окружающая среда, локальное и региональное качество воздуха, истощение озонового слоя, устойчивые органические загрязнители (POPs) и тяжелые металлы.

К числу вопросов, требующих ответов, принадлежат:

- Каковы ключевые взаимосвязи между различными изменениями окружающей среды и какими факторами они обусловлены?
- Каким образом осуществляются взаимосвязи между различными антропогенными воздействиями и в какой степени они могут быть «отключены», если это потребуется?
- В какой мере проявляется взаимозависимость между обеспечиваемой экосистемами продукцией и функционированием экосистем?
- Каковы существующие в настоящее время взаимосвязи между воздействиями и реакциями на них и в какой степени они могут быть перегруппированы или устранены в случае необходимости изменить взаимодействия в системе природа - общество?

Пока общество пытается ответить на эти вопросы современное состояние глобальных экосистем вызывает большую озабоченность. За последние 50 лет экосистемы земного шара подверглись таким антропогенно обусловленным изменениям, которых они не испытывали в течении всей эволюции в период голоцена. Такого рода изменения были связаны с увеличением численности населения и ростом потребностей в пище, пресной воде, древесине, волокне и топливе. Естественно, что подобные изменения способствовали прогрессу социально-экономического развития и благосостояния людей, но в такой различной степени (в различных регионах земного шара и для разных групп населения), что в некоторых случаях последствия использования ресурсов биосферы для людей оказались негативными. Не менее важно, что реальная цена воздействия на глобальную биосферу начала осознаваться лишь в последние годы, причем их негативные последствия для части людей определяются рассмотренными далее тремя проблемами, от решения которых зависят долговременные возможности устойчивого использования ресурсов биосферы.

Во первых, как показали оценки состояния экосистем на рубеже тысячелетий [16], около 60% экосистем подверглись либо деградации, либо неустойчивому использованию, включая такие ресурсы как пресная вода, уловы рыбы, локальный и региональный климат, а также наблюдалось влияние на природные бедствия и паразитов. Хотя связанные с этим материальные потери оценить трудно, но не вызывает сомнений, что они значительны и характеризуются трендами усиления. Многие экосистемы подвергались повреждению, обусловленным воздействиями на другие «экосистемные службы» – например, связанные с производством пищи.

К числу конкретных проявлений воздействий на экосистемы относятся следующие факты.

- За 65 лет после 1950 г. произошла более значительная трансформация территории суши в сельскохозяйственные земли, чем в течение предшествующих 150 лет (1700-1850 гг.). В настоящее время культивируемые земли (районы, где не менее 30% ландшафтов занято землями сельскохозяйственного назначения) занимают примерно одну четверть поверхности суши. Пахотные земли занимают 13812040 км², пастбища расположены на 33556943 км² и земли с долговременными посадками составляют 1484087 км².

- За последние несколько десятилетий потеряно 19% глобальных коралловых рифов и ожидается, что в ближайшие 10-20 лет будет потеряно еще 17%, многие из которых уже подверглись значительной деградации. За то же время утрачено 35% мангровых лесов (около половины этих лесов в тех регионах, где документация наиболее полна).

- После 1960 г. объем воды в водохранилищах за дамбами возрос в четыре раза. В условиях искусственных резервуаров находится в 4-6 раз больше воды, чем в реках. Отъем воды из рек и озер увеличился с 1960 г. вдвое, а поступление в них фосфора утроилось. В глобальных масштабах около 70% воды используется в интересах сельского хозяйства.

- Начиная с 1960 г. произошел рост поступления химически активного (биологически доступного) азота в экосистемы суши в два раза, а поток фосфора утроился. Более половины всех синтетических азотных удобрений, которые были впервые произведены в 1913 г., использовано позднее 1985 г.

- После 1750 г. концентрация углекислого газа в атмосфере возросла с 280 до 414,7 млн⁻¹ в мае 2019 г., что явилось главным образом следствиями сжигания ископаемых топлив и изменений землепользования. Примерно 60% этого роста пришлось на период после 1959 г.

Совершенно отчетливым и угрожающим стал спад биоразнообразия:

- В настоящее время потери биологического разнообразия составляют около 10 тыс. видов, что в 10 раз больше естественной фоновой скорости вымирания биологических видов.

- К 1990 г. более двух третей площади самых крупных биомов суши были превращены главным образом в сельскохозяйственные земли. При этом 25% земельных ресурсов приходится на Азию и 6% на Австралию. В 2019 г. сельскохозяйственная площадь составляла 13,2%.

- В пределах ареалов различных таксономических групп наблюдался спад либо численности, либо диапазона разнообразия большинства видов.

- Распределение видов на Земле становится более однородным: совокупность видов, наблюдаемая в каком-либо регионе, становится более похожей на соответствующую другому региону, что является следствием, главным образом, преднамеренной или непреднамеренной интродукции видов в сочетании с усилившимися дальними перемещениями и перевозками.

- Имеет место спад общего числа видов на планете. За последние несколько сотен лет скорость антропогенно обусловленной экстинкции видов возросла более, чем в 1000 раз, по сравнению с фоновым уровнем, характерным для истории планеты. Примерно 10-30% видов млекопитающих, птиц и амфибий угрожает истребление. Наиболее высокая доля находящихся под угрозой видов характерна для пресноводных экосистем.

- Происходил глобальный спад генетического разнообразия, особенно в случаях культивируемых видов.

Сильные изменения экосистем обусловлены, как правило, необходимостью удовлетворения возрастающих потребностей в пище, воде, древесине, волокне и топливе. Однако непреднамеренные повреждения некоторых экосистем были обусловлены также строительством дорог, морских портов, развитием городов и повышением уровня загрязнений окружающей среды.

Глобальная численность населения, перешагнувшая в начале 21-го тысячелетия границу 7 млрд. и более (в июле 2019 г. было 7 718 989 тысяч), чем шестикратный подъем масштабов экономики определили радикальное возрастание требований к «экологическим службам». Связанные с этим возрастающие потребности в использовании природных ресурсов еще более обостряют экологическую обстановку практически во всех уголках земного шара. Важное значение имеет тот факт (хотя все еще не полностью установленный), что происходящие изменения экосистем могут повышать вероятность нелинейной динамики экосистем (включая ускоряющиеся, внезапные и потенциально необратимые изменения), способной негативно повлиять на устойчивое функционирование систем жизнеобеспечения. Примерами, относящимися к подобной ситуации, могут служить вспышки заболеваний, резкие изменения качества питьевой воды, формирование «мертвых зон» прибрежных вод, коллапс рыболовства, изменения регионального климата и др.

К сожалению, многочисленные анализы фактов и оценок глобальных изменений в динамике и эволюции подсистем СПО с различными выводами экспертов

не дают конструктивного и безопасного механизма взаимодействия человека и природы, а лишь каждый раз ставят новые вопросы. Тем не менее, перечисление и обсуждение базовых проблем позволяет ближе подойти к созданию такого механизма.

Информационно-моделирующие технологии в изучении глобальной экодинамики

С развитием общества все острее становится проблема охраны окружающей среды от последствий антропогенного воздействия на обширных территориях. Даже использование спутниковых систем мониторинга окружающей среды не дает возможности получения достоверных оценок ее состояния. В результате государствам приходится выделять значительные финансовые средства на создание и модернизацию систем мониторинга. Поэтому естественно возникла задача создания такой технологии синтеза этих систем, чтобы которая обеспечивала при минимальных затратах максимальную эффективность контроля состояния подсистем окружающей среды.

Методы локальной диагностики окружающей среды не могут дать комплексную оценку состояния природного объекта или процесса, особенно в случае, когда этот элемент окружающей среды занимает обширные пространства. Любые технические средства сбора данных об окружающей среде позволяют получать лишь отрывочную во времени и фрагментарную по пространству информацию. В частности, микроволновые радиофизические системы дистанционного зондирования, широко используемые при оснащении летающих лабораторий и природно-ресурсных спутников, поставляют ряды данных, которые географически привязываются к трассам полета. Восстановление информации в межтрассовом пространстве возможно лишь с помощью методов пространственно - временной интерполяции, для развития которых многими авторами привлекаются методики и алгоритмы имитационного моделирования.

С точки зрения решения комплексной задачи диагностики окружающей среды важен синтез системы, объединяющей такие функции, как сбор данных с помощью дистанционных и контактных методов, их анализ и накопление с последующей тематической обработкой. Такая система способна обеспечивать систематическое наблюдение и оценку состояния окружающей среды, предопределять прогнозную диагностику изменений элементов окружающей среды под влиянием хозяйственной деятельности и при необходимости анализировать развитие процессов в окружающей среде при реализации сценариев антропогенного характера с выдачей предупреждений о нежелательных изменениях характеристик природных подсистем. Реализация таких функций мониторинга окружающей среды возможна при использовании методов имитационного моделирования, обеспечивающих синтез модели изучаемой природной системы.

Развитие моделей биогеохимических, биоценологических, гидрофизических, климатических и социально-экономических процессов в окружающей среде, обеспечивающих синтез образов ее подсистем, неизбежно требует формирования систем автоматизации обработки данных мониторинга и создания соответствующих баз данных. Как показали многочисленные исследования в этом направлении, существуют сбалансированные критерии отбора информации, учитывающие иерархию причинно-следственных связей в биосфере, которые включают согласование допусков и глубины пространственной дискретизации при описании атмосферы, наземных экосистем и гидросферы, степень их элементной детализации.

Применение математического моделирования в системах спутникового мониторинга, как показывают многочисленные исследования, может дать практический эффект только при создании единой сети данных, сопряженной с моделью системы природа-общество. Концептуальная схема адаптивного режима таким образом организованного мониторинга диктует принятие такой архитектуры системы мониторинга, которая бы объединяла знания различных наук в единую систему и создавала возможность гибкого управления этими знаниями. Это возможно по пути объединения ГИС-технологии, методов экспертных систем и имитационного моделирования.

Развитие ГИС-технологии

ГИС обеспечивает обработку географических данных, связь с базами данных и символическое представление топологии изучаемых территорий. Расширение ГИС до ГИМС=ГИС∪Модель изменяет некоторые функции пользовательского интерфейса компьютерных картографических систем, включая прогнозные оценки на основе априорных сценариев изменения условий функционирования подсистем окружающей среды. При этом имеющиеся измерения параметров подсистем могут использоваться как для оценки коэффициентов моделей, так и непосредственно для прогнозной оценки по методике эволюционной технологии.

Развитие и применение идей ГИМС-технологии, предусматривающей соединение методик и алгоритмов математического моделирования с наземными и дистанционными измерениями характеристик окружающей природной среды, как показывает опыт, возможно на базе синтеза летающих и передвижных лабораторий. В будущем именно такие комплексы будут решать следующие основные задачи:

- Прогнозирование времени начала и степени опасности стихийных бедствий, аварийных ситуаций и техногенных катастроф.
- Контроль динамики аварий и катастроф, в том числе и в сложных метеоусловиях, и выдача информации для принятия решения.
- Оценка последствий аварий и катастроф для городов, сельскохозяйственных и лесо-болотных угодий, морской и приморской флоры и фауны.
- Выдача целеуказаний спасательным службам при проведении поисково-спасательных работ.

ГИМС-технология позволит решать проблемы мониторинга территорий крупных промышленных центров. Среди них можно указать такие как:

- изучение сезонных параметров элементов городского и пригородного ландшафтов, геофизических полей и локальных аномалий различной природы, выявление закономерностей взаимосвязи их феноменологических и топологических характеристик, представление результатов исследования в виде тематических карт стандартизованного масштаба;
- создание методологии оценок экологического и санитарного состояния жилой, промышленной, лесопарковой и пригородной зон, водоемов и рек, теплотрасс и продуктопроводов, транспортных и электросетей;
- исследование сезонной и суточной динамики характеристик мест складирования бытовых и производственных отходов, источников загрязнения земных покровов, воздушного и водного бассейнов;
- решение обратных задач и разработка статистических критериев подобия применительно к локальным антропогенным и геофизическим особенностям го-

родской и пригородной территорий, приземной атмосферы, облачности и озонового слоя, динамики загрязнения и их элементов.

Системы мониторинга, базирующиеся на ГИМС-технологии, должны реализовываться на основе данных следующих пяти взаимодополняющих друг друга ступеней, обладающих должным техническим, методическим и метрологическим обеспечением:

- Съёмки с борта космических аппаратов:
 - оценки глобальных экологических характеристик исследуемого региона (с учетом интересов нижележащих уровней экомониторинга);
 - оптическая прозрачность, состояние малых газовых и аэрозольных составляющих атмосферы Земли;
 - интегральная характеристика техногенного загрязнения воздушного и водного бассейнов, состояния озонового слоя;
 - состояние земных покровов и градостроительных объектов.
- Исследования с борта многоцелевых и специализированных самолетов-лабораторий:
 - экологические характеристики окружающей среды региона (с учетом интересов третьего и четвертого уровней экомониторинга);
 - энергетические и поляризационные характеристики микроволновых полей излучения и отражения элементов городского и других пейзажей;
 - радиотепловые и радиолокационные изображения территории города, мегаполиса, участка леса и других территорий;
 - изображения и параметры теплового поля ландшафта в ближнем и дальнем ИК-диапазонах;
 - оптическая прозрачность, влагосодержание и другие характеристики атмосферы при ее зондировании в надирном и зенитном направлениях;
- Вертолетные и легкомоторные самолетные лаборатории. Они обеспечивают данными маловысотный (80-500 м) уровень экомониторинга в плане фиксации параметров:
 - локальных эко-характеристик региона (с учетом интересов передвижных и стационарных наземных или плавающих пунктов наблюдения);
 - загрязнения приземной атмосферы газовыми и твердыми аэрозолями;
 - фона и аномалий радиоактивности окружающей среды; тепловых полей (ИК и СВЧ диапазонов) отдельных участков региона;
 - антигенного загрязнения воздушной среды в зоне дыхания людей;
- Автомобильные, судовые и стационарные пункты наблюдения. Эти пункты определяют и уточняют в пределах отдельных маршрутов и секторов региона местоположения и структуры локальных эко-аномалий.
- Пятый уровень экомониторинга обеспечивается непосредственно ГИМС-технологией:
 - сбор, аннотирование и хранение данных всех четырех уровней экомониторинга в единой пространственно-временной системе координат;
 - экспресс анализ, обработка и привязка к характерным точкам местности и карте экспериментальных и рассчитанных оценок состояния окружающей среды с выделением их особенностей;
 - идентификация источников загрязнения и других нарушений окружающей среды, оценка динамики и прогнозирование последствий их влияния на экологию

ческую и санитарную обстановку, выявление путей миграции и концентрации вредных веществ по территории региона;

- подготовка информации для потребителя в стандартизованных формах, обеспечивающих воссоздание объективной картины экологической и санитарной обстановки, а также обосновывающих пути рационального решения текущих и перспективных природоохранных проблем.

Глобальный климат и энергетика

Несмотря на наблюдаемое изменение климата и связанное с этим возрастание природных катастроф интенсивное развитие хозяйственной деятельности человека (определяемое, прежде всего, продолжающимся возрастанием численности населения на Земле) диктует необходимость дальнейшего развития энергетики. Основу производства энергии все еще составляет использование углеводородного сырья, что порождает серьезные экологические последствия. Не случайно в повестке дня состоявшегося 7-8 июля 2005 г. в Шотландии совещания группы восьми ведущих государств мира (группа G-8) в качестве одной из двух ключевых проблем была выбрана проблема глобального потепления, а следующая сессия G-8 (2006 г., Россия) сконцентрировалась на обсуждении проблем энергетики. Озабоченность ведущих стран мира связана с тем, что отсутствует научно обоснованный надежный прогноз изменения региональных температур и осадков, что вызывает неопределенность в принятиях природоохранных мероприятий и не формализует наблюдаемые тенденции в возрастании природных катастроф, особенно засух и наводнений. Из-за этого возникают кризисные ситуации, такие как в Бразилии. В 2001 г. в Бразилии случился серьезный кризис, который вынудил ввести ограничения на потребление энергии, чтобы избежать катастрофических «блэкаутов». Главными причинами кризиса были:

1) длительные засухи, продолжавшиеся (в различных регионах) на протяжении до 6 лет (1996-2001 гг.) и снизившие выработку гидроэлектроэнергии;

2) возрастающее энергопотребление;

3) задержки с пусками новых электростанций. Специфика производства электроэнергии в Бразилии состоит в том, что в 2002 г. около 85 % приходилось на долю гидроэлектростанций, причем планирование гидроэлектрической системы предусматривало удовлетворение требований к уровню производства в случае последовательности трех засушливых лет.

Однако в апреле 2001 г. объем воды в водохранилищах гидроэлектростанций составлял лишь 20-30 % по сравнению с максимальным значением. Именно это побудило правительство Бразилии принять решение о серьезном ограничении потребления электроэнергии.

Естественно, что сильная «экозависимость» производства электроэнергии диктует необходимость его диверсификации. В этой связи возникает необходимость комплексного анализа современного состояния и перспектив дальнейшего развития глобальной энергетики, имея в виду возможности его диверсификации, меры в области экономики энергопотребления, повышения уровня эффективности производства энергии и минимизацию негативных экологических последствий (переход от углеводородной к «чистой» энергетике). Речь идет о достижении в каждой отдельной стране и в мире в целом такого уровня производства энергии, который был бы экологически безопасным, устойчивым и обеспечивающим растущие потребности экономики (заметим, что, например, США затрачивают в на-

стоящее время около полумиллиарда долларов ежедневно на импорт нефти, преимущественно из стран Ближнего Востока).

Важный аспект проблемы состоит в неспособности рыночных механизмов регулировать энергетику с точки зрения ее устойчивости и экологической безопасности, что диктует необходимость вмешательства правительств и международных организаций. Обсуждение проблем энергетики обычно ограничивается анализом динамики потребительских цен на энергоносители и различных кризисных ситуаций, порожденных дефицитом энергоресурсов. К сожалению, никакие долгосрочные прогнозы ценовой политики в области рынка энергоресурсов не работают. Эти прогнозы и биржевые колебания особенно оказались непредсказуемыми в 2014-2015 гг., когда уровень неопределенности резко повысился.

Данные табл. 1 и 2 иллюстрируют быстрое возрастание глобального потребления ископаемых топлив по данным Института мониторинга глобальных ресурсов (США) за 1950-2015 гг. [19]. Более детальное рассмотрение статистических данных, относящихся к различным видам ископаемых топлив и к энергоресурсам вообще, показывает большую неравномерность распределения энергопотребления по различным странам. Это означает, что достижение сбалансированной политики в области реализации мероприятий по предотвращению неконтролируемых воздействий на глобальный климат остается на уровне экспертных обсуждений. Результаты табл. 1 наглядно показывают эту несбалансированность.

Таблица 1.

**Глобальное потребление ископаемых топлив
(в млн. тонн нефтяного эквивалента) за 2000-2015 гг.**

Год	Уголь	Нефть	Газ	Год	Уголь	Нефть	Газ
2000	2360,9	3537,2	2191,9	2008	3500,1	3999,0	2751,0
2001	2381,3	3554,9	2214,7	2009	3451,9	3922,9	2679,1
2002	2433,5	3589,0	2286,0	2010	3611,2	4041,8	2879,7
2003	2629,2	3655,6	2341,7	2011	3777,4	4085,4	2943,8
2004	2914,5	3870,8	2435,6	2012	3798,8	4133,2	3017,8
2005	3122,4	3919,3	2505,3	2013	3867,0	4179,1	3052,8
2006	3278,0	3968,9	2577,9	2014	3881,8	4211,1	3065,5
2007	3457,5	4017,3	2675,4	2015	3923,3	4248,9	3120,7

Таблица 2.

Годовое потребление энергии и выбросы CO₂ в различных странах

Страна	Коммерческая энергия, подушное потребление в нефтяном эквиваленте.	Нефть, баррелей/сутки на 1000 человек	Электроэнергия, кВт/час/человек	Подушные выбросы углекислого газа, тонн
США	8,1	70,2	12331	19,7
Япония	4,1	42,0	7628	9,1
Германия	4,1	32,5	5963	9,7
Польша	2,4	10,9	2511	8,1
Бразилия	1,1	10,5	1878	1,8
Китай	0,9	4,2	827	2,3
Индия	0,5	2,0	355	1,1
Эфиопия	0,3	0,3	22	0,1

Министры по энергетике стран G7 подписали в Риме в 2014 г. совместное заявление об энергетической безопасности. Основная проблема состоит в сбалансированном использовании природных ресурсов. К сожалению, в мире не существует единого механизма достижения этой сбалансированности. Анализ имеющихся статистических данных показывает, что мировое потребление природного газа и угля выросло почти на 0,4%, потребление ядерной энергии возрастает ежегодно на 1,8%, выработка гидроэлектрической энергии в среднем растет на 2%. Особое внимание уделяется возобновляемым источникам энергии. В 2019 г. их потребление превысило 3,3% от глобальной энергии. Безусловно, эти показатели сильно варьируют по регионам земного шара.

К сожалению, совещание G20 в 2019 г. в Японии не принесло согласия между странами по вопросу глобального потепления. Проблема остается дискуссионной по многим причинам. Особенно оспаривается роль населения в изменении климата. Многие авторы убеждены в том, что эта роль проявляется через загрязнение атмосферы и уничтожение стоков CO₂ из атмосферы. В процентном отношении мнения разделены примерно так: 66,6% убеждены, что человек слабо влияет на изменение климата; 32,6% утверждают, что изменение климата происходит только по вине человека, около 47% утверждают, что изменения климата происходят при совместном влиянии природных и человеческих факторов.

Литература

1. Горшков В.Г., Кондратьев К.Я., Лосев К.С. (1998) Глобальная экодинамика и устойчивое развитие: естественнонаучные аспекты и «человеческое измерение» // *Экология*, 1998. № 3. С. 163-170.
2. Горшков В.Г., Есенин Б.К., Карибаева К.Н., Курочкина Л.Я., Лосев К.С., Макарова А.М., Шукуров Э.Д. (2004) Научные основы стратегических направлений природоохранной политики // *Экология и образование*. 2004, № 1. С. 2-9.
3. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. (2005б) Ключевые проблемы глобальной экодинамики // *Исследование Земли из космоса*, 2005. № 4. С. 1-21.
4. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Лакаса Х., Савиных В.П. (2006) Глобализация и устойчивое развитие: экологические аспекты. СПб: Наука, 2006. 241 с.
5. Chen J., Burrow S., Mochizuki Y., Yong L. (2015) Our planet: making our future chemical-safe. Nairobi, Kenya: UNEP, 2015. 46 pp.
6. Held D., McGrew A. (2007a) Globalization theory: Approaches and controversies. Cambridge: Polity Press, 2007. 288 pp.
7. Held D., McGrew A. (2007b) Globalization/anti-globalization: Beyond the great divide. Cambridge: Polity Press, 2007. 304 pp.
8. Kavous A. (2010) Globalization and regionalization: Four paradigms views // *Journal of International Business Research*, 2010. V. 9. Nr. 1. P. 71-76.
9. Kerr R.A. (2005) How hot will the greenhouse world be? // *Science*, 2005. V. 309. P. 100.
10. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. (2019) Nature-society system survivability indicators. *Journal Science and Technology Binh Duong University*, 2019, No.1 pp. 1-10.
11. Krapivin V.F. Varotsos C.A. (2007) Globalization and sustainable development. Chichester, U.K.: Springer/Praxis, 2007. 304 p.
12. Krapivin V.F. and Varotsos C.A. (2008) Biogeochemical cycles in globalization and sustainable development. Chichester, U.K.: Springer/Praxis, 2008. 562 p.
13. Lindowsky M., Krocova S. (2015) Water management in emergency situations // *Journal of Geological Resource and Engineering*, 2015. Nr. 3. P. 150-162.

14. Lomborg B. (2004) Global crisis, global solutions. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. 670 pp.
15. Nitu C., Krapivin V.F., Potapov I.I. (2017) Global Climate and Sustainable Development Problems. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 2017, 600 pp.
16. Reid W.V. (2005) Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis. Washington: Island Press, 2005. 155 pp.
17. Spooner B. (2015) Globalization: The crucial phase. Philadelphia, USA: University of Pensilvania Press, 2015. 392 pp.
18. UNEP (2004) UNEP Science Initiative. Environmental Change and Human Needs: Assessing Inter-linkages. An Input to the Fourth Global Environment Outlook (GEO-4). Concept Paper. Nairobi, Kenya: UNEP, 2004. 36 p.
19. WEO (2015) World Energy Outlook 2014. Paris: OECD/IEA, 2015. 12 pp.

СБАЛАНСИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА

Д-р физ.-мат. наук, **В.Ф. Крапивин**,
(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва)
д-р техн. наук, проф. **В.С. Шалаев**
(Мытищенский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BALANCED MODEL OF GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CARBON CYCLE

V.F. Krapivin, V.S. Shalaev

Ключевые слова: углерод, модель, эксперимент, биосфера

Key words: carbon, model, experiment, biosphere

Обсуждены аспекты формирования глобального цикла углекислого газа и отмечены проблемы изучения его сбалансированности. Согласно имеющимся исследованиям глобальный круговорот углерода включает три основных круга его циркуляции, отличающихся временем обращения углерода между его резервуарами. Охарактеризованы модели глобального круговорота углерода. Представлена новая модель, отражающая наиболее важные прямые и обратные связи углеродного цикла с другими элементами биосферы. На основе моделирования получены количественные оценки потоков углерода. Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 19-07-00443).

Dimensions of global carbon dioxide cycle formation are discussed and the problems of its balance are noted. According to the existing investigations, global carbon cycle has three basic cycles having specific time for its circulation between reservoirs. Models of global carbon cycle are characterized. New model is given to reflect the most important direct and indirect correlation of carbon cycle with others biosphere elements. Numerical data are received for the carbon fluxes as modeling results.

Введение

В связи с началом действия Киотского Протокола, ориентированного на предотвращение потепления климата Земли вследствие парникового воздействия антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2), возникает настоятельная необходимость уточнения моделей циркуляции углерода в окружающей среде с целью получения более объективных оценок степени и характера данного воздействия. Это вызвано тем, что имеющиеся представления о роли атмосферного CO_2 в наблюдаемых изменениях климата основаны на весьма неточных и неполных схемах, описывающих потоки углерода между его основными резервуарами на планете. Анализу возникающих здесь проблем посвящены многие исследования [1-27]. Одной из них является разработка сбалансированной схемы глобальных

потоков углерода. Ведь примерно 27% стока углерода из атмосферы в имеющихся схемах остается не объясненным.

Исследования Кондратьева и др. [9, 10, 22-24] показали, что учет пространственной неоднородности стоков и источников атмосферного углерода и уточнение параметров его потоков на границах *атмосфера-суша* и *атмосфера-океан* повышают точность оценок, но не устраняют ни указанного дисбаланса, ни расхождения между потоками углерода и динамикой изменения парциального давления углекислого газа в земной атмосфере.

Реализуемая в рамках глобального углеродного проекта GCP (Global Carbon Project) программа контроля потоков углерода в условиях развития современной цивилизации, к сожалению, пренебрегает этим противоречием. Это в значительной мере снижает доверие к существующим сценариям ожидающих Землю природных катаклизмов, вызванных таянием арктических и антарктических льдов, и искажает реальную картину антропогенного влияния на климатические процессы.

Наиболее принципиальный недостаток программы GCP состоит в том, что она не учитывает геологическую компоненту современного круговорота углерода [2]. По имеющимся оценкам, весьма приближенным, в породах земной коры и мантии (литосфере) сосредоточено $\approx 10^{23}$ г углеродсодержащих газов [11, 14]. Находящаяся в них масса углерода в $\approx 10^4$ раз превышает его количество, присутствующее сегодня в биосфере (над земной поверхностью). Между биосферой и литосферой происходит постоянный очень интенсивный обмен углеродом, носящий самоорганизующий характер. По данным исследований [1, 2] в результате действия принципа Ле Шателье содержание подвижного углерода в системе стремится к устойчивому соотношению

$$n_i/\tau_i=C=\text{const} \quad (1)$$

где n_i и τ_i - соответственно общее количество и среднее время пребывания подвижного углерода (во всех формах) в i -м резервуаре системы; C - константа, характеризующая скорость круговорота углерода в системе. Для современного состояния круговорота углерода в биосфере $C = (2,7 \pm 0,05) \cdot 10^{17}$ г CO_2 / год .

Если условие (1) выполняется, то уход углерода из одного какого-либо резервуара системы вследствие круговорота пополняется его поступлением из других резервуаров. Если условие (1) не выполняется, то в системе возникают некомпенсированные перетоки вещества, которые возвращают ее к равновесию.

В процессе глобального круговорота подвижный углерод многократно пересекает земную поверхность. Над поверхностью Земли, играющей роль "геохимического барьера", он циркулирует преимущественно в окисленном виде (CO_2), а под этой поверхностью - главным образом в восстановленной форме (CH_4). Это обстоятельство требует совместного изучения глобальных круговоротов CO_2 и CH_4 [10].

Среди всех факторов, управляющих перераспределением углерода над (и под) поверхностью планеты, наиболее важную роль в современную эпоху играют два процесса, носящих в основном региональный характер: 1) перенос углерода метеогенными водами и 2) хозяйственная деятельность человека. Благодаря первому фактору избыточный углерод на континентах поступает с метеогенными водами под земную поверхность, где, восстанавливаясь до углеводородов (УВ), участвует в процессах современного нефтегазообразования [3]. Вследствие этого промышленные месторождения нефти и газа размещаются, во-первых, в пределах крупных осадочных бассейнов, дренирующих огромные по площади террито-

рии и, во-вторых, тяготеют к зонам разломов земной коры. Наличие разломов, с одной стороны облегчает проникновение метеогенных вод под поверхность Земли, а с другой – способствует разгрузке этих вод от транспортируемого ими углерода [2,4].

Фактические данные свидетельствуют [16], что заметное пополнение месторождений нефтью и газом происходит за время 10-50 лет. Столь малое время формирования залежей обусловлено высокой скоростью переноса углерода через земную поверхность водами [2, 3]. По измерениям, вероятно заниженным, эта скорость в масштабе всей планеты составляет $\approx 5 \cdot 10^{15}$ гС/год [6,7]. Данный процесс крайне неравномерен [15]. Основная масса углерода опускается "вниз" в пределах материков и на их окраинах. А поступает "наверх" в зонах срединных океанических хребтов, по континентальным разломам, а также при многочисленных вулканических извержениях на океаническом дне. Количественно эти восходящие и нисходящие потоки углерода на континентах и, особенно, в океанах изучены, к сожалению, пока еще крайне слабо [7]. Но это говорит о том, что глобальный круговорот углерода нельзя изучать изолированно также и от планетарного круговорота воды [9].

Антропогенный фактор перераспределения углерода между наземными и подземными резервуарами проявляется в добыче и использовании нефти (4 млрд. т/год) и природного газа (350 трлн. м³/год). Тем самым суммарная масса потребляемого ископаемого углерода составляет $\approx 7 \cdot 10^{15}$ гС/год, что сопоставимо с его количеством, поступающим на поверхность за счет естественной циркуляции. Поэтому хозяйственная деятельность людей, неразрывно связанная с этими объемами утилизации УВ, наряду с воздействием на климат способна во многом влиять и на региональные процессы генерации нефти и газа в недрах [4].

В проекте GCP данное обстоятельство также необходимо учитывать. Современная практика транспортировки нефти и газа на многие тысячи километров от мест добычи может привести к существенному перераспределению мировых ресурсов углеводородов, причем в ближайшие десятилетия. Интенсивно потребляющие нефть и газ промышленно-развитые страны будут аккумулировать УВ на своей территории, тогда как страны, специализирующиеся на добыче и экспорте нефти и газа, могут быстро свои ресурсы исчерпать.

С учетом высказанных выше соображений за основу более корректного изучения парникового эффекта может быть взята общая схема круговорота углерода [10], дополненная "геологическим" блоком (рис. 1). Эта схема наряду с описанием основных потоков CO₂ в биосфере учитывает также возможность накопления подвижного углерода под земной поверхностью, чем замыкается и становится уравновешенной.

Базовая модель

Схема рис. 1 уравнивает все потоки углерода, отражая обмены углеродом на границах атмосферы с земными покровами и акваториями морей и океанов и учитывая роль дегазационных процессов и движение метеогенных вод через земную поверхность. Согласно [2] глобальный круговорот углерода включает три основных круга его циркуляции, отличающихся временем обращения углерода между его резервуарами. Для точного расчета количественных оценок всех потоков углерода необходимо определить пространственные и предметные распределения акваторий, земных покровов и геосферы с указанием их собственных характеристик. Современный уровень знаний позволяет решить эту задачу лишь

частично и, тем самым, уменьшить интервал неопределенности в оценках будущего изменения климата. Однако используемая при этом модель глобального круговорота углерода должна отражать не только пространственную мозаику его резервуаров, стоков и источников, но и обеспечивать динамический расчет их мощностей. Сделанные до настоящего времени расчеты с помощью подобных моделей не в полной мере учитывали сведения о состоянии и классификации земных покровов, а тем более об изменчивости акваторий Мирового океана. Поэтому формирование схемы пространственного распределения почвенно-растительных формаций и квазиоднородных акваторий Мирового океана позволит преодолеть указанные выше недостатки предшествующих моделей. Система балансовых уравнений для схемы рис. 1 с учетом обозначений табл. 1 имеет вид:

$$\frac{\partial \alpha_S(\varphi, \lambda, z, t)}{\partial t} = \sum_{j \in \Omega_S} H_{jS} - \sum_{m \in \Omega_S} H_{Sm}, \quad (i = 1, \dots, N); \quad (2)$$

где S - резервуар углерода (А-атмосфера, U - верхний фотический слой океана над термоклином, L - суша, I - промежуточный фотический слой океана под термоклином, D - глубокие слои океана, N - придонный слой океана, G - геосфера,), φ - широта, λ - долгота, z - глубина, t - время, H_{jS} - поток углерода из j -го резервуара в резервуар S , H_{Sm} - сток углерода из резервуара S в m -й резервуар, Ω_S - множество резервуаров углерода, граничащих с резервуаром S ; α_S - запас углерода в резервуаре S .

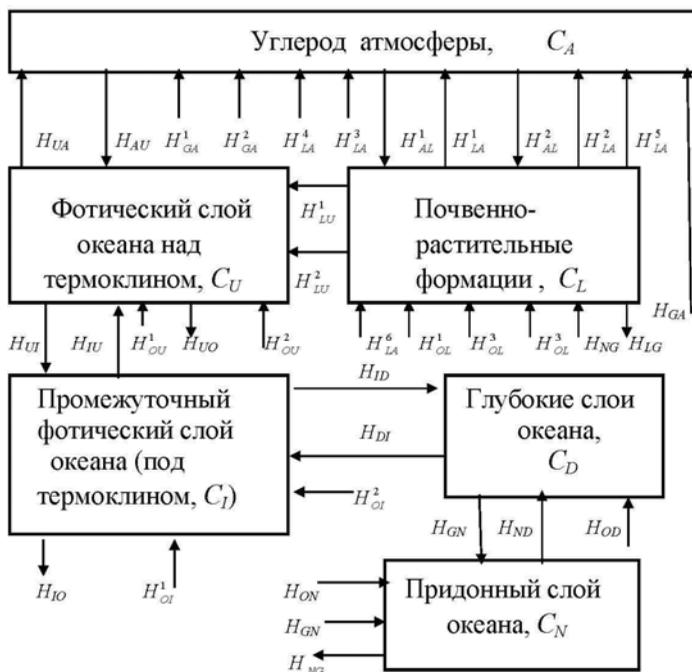


Рис. 1. Блок-схема глобального биогеохимического круговорота углерода в системе атмосфера-суша-океан-геосфера. Описание резервуаров и потоков углерода дается в табл. 1.

В уравнении (2) скорость V и потоки H являются нелинейными функциями характеристик окружающей среды. Вид этих функций подробно описан, например, в работе [10]. Остановимся здесь лишь на их уточнении. В первую очередь такого уточнения требуют элементы биогеоценотического блока. Для этого всю поверхность суши Σ покроем однородной сеткой географических пикселей $\Sigma_{ij} = \{(\varphi, \lambda): \varphi_{i-1} \leq \varphi < \varphi_i; \lambda_{j-1} \leq \lambda < \lambda_j\}$ с границами по широте $(\varphi_{i-1}, \varphi_i)$ и долготе $(\lambda_{j-1}, \lambda_j)$ и площадью σ . Количество пикселей определяется доступной базой данных, т.е. выбором размеров сетки $(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$: $i=1, \dots, n$; $n=[180/\Delta\varphi]$; $j=1, \dots, k$; $k=[180/\Delta\lambda]$. В каждом таком пикселе возможно размещение N типов поверхностей, включая типы почвенно-растительных формаций, акваторий водных систем и антропогенных объектов. Динамика растительного покрова s -го типа подчинена закону:

Таблица 1.

Потоки углерода в форме CO_2 в биосфере, учитываемые в имитационной модели глобального биогеохимического круговорота углерода, блок-схема которой представлена на рис. 1.

Потоки углерода	Идентификатор в модели	Средняя оценка потока (10^9 тС/год)
Выделение при сжигании растительности	H_{LA}^1	6,9
ископаемого топлива	H_{GA}^1	3,6
Десорбция	H_{UA}	97,08
Сорбция	H_{AU}	100
Выветривание горных пород	H_{AL}^1	0,04
Вулканические эманации	H_{GA}^2	2,7
Поглощение наземной растительностью	H_{AL}^2	224,4
Дыхание растений	H_{LA}^2	50-59,3
людей	H_{LA}^3	0,7
животных	H_{LA}^4	4,1
Выделение при разложении гумуса почв	H_{LA}^5	139,5
корнями растений	H_{LA}^6	56,1
Жизнедеятельность населения	H_{OL}^1	0,3
животных	H_{OL}^2	3,1
Отмирание растительности	H_{OL}^3	31,5-50
Выпадение в донные осадки	H_{NG}	0,1-0,2

Растворение морских отложений	H_{GN}	0,1
Разложение детрита		
в фотическом слое	H_{OU}^1, H_{OI}^1	35
в глубоких слоях океана	H_{OD}	5
Подъем с глубинными водами	H_{ND}, H_{DI}, H_{IU}	45
Опускание с поверхностными водами		
и за счет гравитационного оседания	H_{UI}, H_{ID}, H_{DN}	40
Фотосинтез	H_{UO}, H_{IO}	69
Подземный сток	H_{LU}^1	0,5
Поверхностный сток	H_{LU}^2	0,5-0,6
Дыхание живых организмов в океане	H_{OU}^2, H_{OI}^2	25
Геосферный сток углерода из биосферы	H_{LG}	70
Поступление углерода из геосферы в биосферу	H_{GA}	17

$$\frac{dB_s}{dt} = R_s - M_s - T_s \quad (3)$$

где R_s – фотосинтез, M_s и T_s – потери биомассы B_s за счет ее отмирания и эвапотранспирации, соответственно.

Компоненты правой части уравнения (3) являются функциями характеристик окружающей среды – освещенности, температуры, влажности атмосферы и почвы, концентрации CO_2 в воздухе. Существуют различные способы и формы параметризации этих функций. Одной из них является модель Коллатца [21], послужившая базовой для глобальной биосферной модели SiB2 [25]. Температура, влажность и скорость испарения влаги в слое растительности и почве связаны зависимостями с биометрическими параметрами и энергетическими потоками в системе *атмосфера-растение-почва*. При этом по аналогии с электростатикой вводится понятие «сопротивления» и потоки рассчитываются по простой формуле: *поток=разность потенциалов/сопротивление*. Модель SiB2 учитывает потоки собственного и скрытого тепла через испарение водяного пара для растительности и почвы, а потоки CO_2 разделяются по классам растительности C_3 и C_4 , что существенно повышает точность параметризации функций правой части уравнений (3). Согласно [21], три фактора регулируют функцию R_s : эффективность фотосинтетической ферментной системы, количество фотосинтетически активной радиации (ФАР), поглощенное хлорофиллом клетчатки, и способность растительного вида к усвоению и экспорту во внешнюю среду продуктов фотосинтеза. Применение принципа Либиха и учет данных о распределении типов растительных покровов по пикселям $\{\Sigma_{ij}\}$, о парциальных давлениях CO_2 и O_2 , о температуре и плотности атмосферы, об уровне освещенности позволяет рассчитать значения потоков H в уравнении (2) для всех пикселей суши.

Модель круговорота углерода в системе *атмосфера – океан* подробно описана в работе [23]. Она базируется на той же сетке географических пикселей, но объе-

диненных по зональному принципу согласно классификации Tarco [26]. Вся толща океанской среды рассматривается как единый биогеоценоз, в котором основным связующим фактором является поток органического вещества, продуцируемого в поверхностных слоях, и затем проникающего до максимальных глубин океана. Регулятором потоков углерода в этой среде является карбонатная система, параметрическое описание которой дано в работе [24].

Многие параметры глобальной модели круговорота углерода могут измеряться в режиме спутникового мониторинга, что дает возможность применить адаптивную схему расчета характеристик парникового эффекта [24]. Эта схема позволяет обучать модель в непрерывном режиме коррекции ее структуры и параметров. Действительно, спутниковые измерения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах обеспечивают оперативные оценки ФАР и таких характеристик растительности, как зеленость растительного полога, площадь живых фотосинтетически активных элементов, влажность почвы и содержание воды в элементах растительного покрова, концентрация CO_2 на поверхности листьев и др. Режим прогнозирования биомассы растительного покрова в каждом пикселе Σ_{ij} и сравнения со спутниковыми измерениями дает возможность корректировать отдельные фрагменты модели, например, применяя дублирование ее блоков или их параметрическую настройку с целью минимизации невязки между прогнозом и измерениями. В частности, для расчета первичной продукции имеется ряд полуэмпирических моделей, использование которых возможно по выборочному критерию в различных пикселях. Определенная свобода выбора имеется также при оценке величины испарения с растительного покрова [27].

Роль апвеллинговых зон Мирового океана

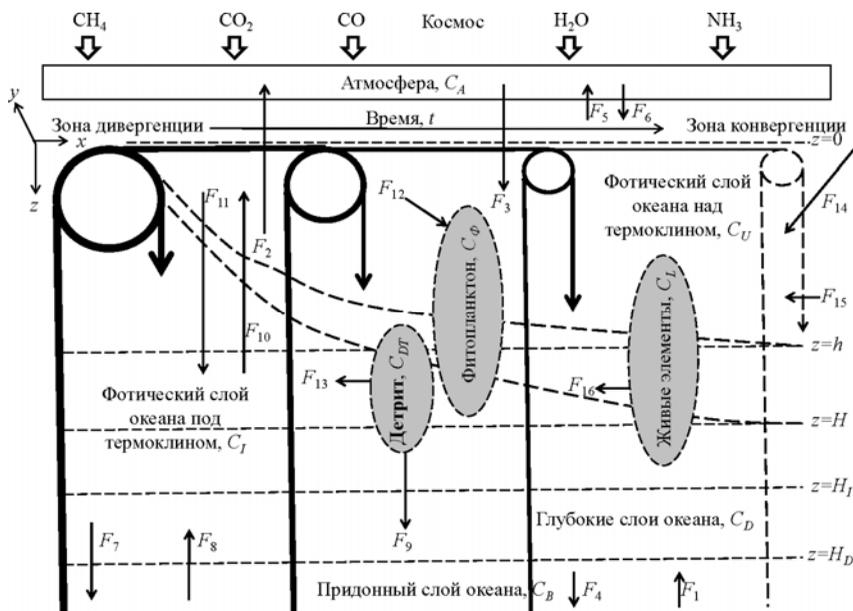


Рис. 2. Вертикальный разрез океана в зоне апвеллинга. Обозначения даны в табл. 2.

Принципиальная схема гидрохимических и биогеохимических процессов в зоне апвеллинга представлена на рис. 2. В случае апвеллинга, расположенного в открытом океане, начало системы координат (xOy) расположено в центре апвеллинга и предполагается, что гидрофизические и экологические характеристики однородны на расстоянии $r=(x^2+y^2)^{1/2}$. Для прибрежного апвеллинга ось координат x перпендикулярна линии берега и все указанные характеристики однородны в направлении оси координат y .

Таблица 2

Резервуары и потоки углерода в виде CO_2 в океане, учитываемые в имитационной модели глобального биогеохимического круговорота углерода, структура которой представлена на рис. 4.

<i>Резервуары и потоки CO_2</i>	<i>Идентификатор</i>	<i>Средние оценки резервуаров (GmC) и потоков ($GmC/год$)</i>
<i>Углерод</i>		
Атмосфера	C_A	650-750
Океан		
Фотический слой выше термоклина	C_U	380-520
Промежуточный фотический слой (под термоклинном)	C_I	280-610
Океанические растения (водоросли)	C_ϕ	3
Живые элементы	C_L	1,5
Детрит	C_{DT}	29
Глубокие слои океана	C_D	28500-33890
Придонный слой океана	C_B	5000
Извержение вулканов	F_5	2,7
Поглощение наземной растительностью	F_6	224,4
Осаждение в донные отложения	F_7	0,1-0,2
Растворение морских осадков	F_8	0,1
<i>Разложение детрита</i>		
Фотический слой	F_{13}	35
Глубокие слои океана	F_9	5
Подъем глубоких вод	F_{10}	45
Гравитационное осаждение	F_{11}	40
Фотосинтез	F_{12}	69
Подземный сток	F_{15}	0,5
Поверхностный сток	F_{14}	0,5-0,6
Дыхание живых организмов в океане	F_{16}	25
Процессы дегазации	F_1	21,16
Донные отложения	F_4	1,3
Десорбция	F_2	97,08
Сорбция	F_3	100

Потоки углерода, представленные на рис. 2 и в табл. 2, используются для балансовых уравнений:

$$\frac{\partial C_{\Xi s}(x, y, t)}{\partial t} + V_{\phi s} \frac{\partial C_{\Xi s}(x, y, t)}{\partial x} + V_{\lambda s} \frac{\partial C_{\Xi s}(x, y, t)}{\partial y} = \sum_{i \in I_s} F_i - \sum_{j \in J_s} F_j$$

где $C_{\Xi s}$ – резервуар углерода в s -м пикселе пространственной структуры в океане, I_s и J_s – источники и стоки углерода соответственно, $V_s(V_{\phi s}, V_{\lambda s})$ – поле ветра в s -м пикселе.

Цикл углерода в океане включает потоки, которые формируются термохалинной циркуляцией, обменом между атмосферой и поверхностным слоем океана, фотосинтезом, окислительными процессами, осаждением и поглощением CO_2 из атмосферы. Детальное описание этих процессов и их параметризация выполнены в работе [22]. Некоторые из них требуют уточнения.

Потоки F_2 и F_3 описывающие физико-химические процессы газового обмена на границе воздух-вода были детально изучены и описаны в [1] и как результат поток F_3 может быть представлен формулой:

$$F_3 = \psi(T_1) \sqrt{p_a} / (1 + 0.5 p_s)$$

где $\psi(T_1)$ – показатель влияния температуры на растворимость CO_2 в воде, p_s – соленость воды, T_1 – температура верхнего слоя океана, p_a – парциальное давление CO_2 в атмосфере. Потоки F_2 и F_3 являются функционально симметричными в зависимости от кислотности воды: при $\text{pH} \leq 8.11$ океан поглощает CO_2 , а при $\text{pH} > 8.11$ океан выделяет CO_2 .

Температура верхнего слоя океана изменяется в зоне апвеллинга, постепенно повышаясь с удалением от его центра. Соответствующие уравнения согласно [21] можно записать в следующей форме:

$$\frac{dT_2}{dz} = \kappa_0 \frac{d^2 T_2}{dz^2} \text{ для } z > z_U,$$

$$T_2 = T_1 \text{ при } z = z_U,$$

$$\frac{dT_2}{dz} = 0 \text{ для } z = z_L,$$

где T_2 – температура воды в слое термоклина, κ_0 – коэффициент вихревой диффузии тепла, z_U и z_L – глубины верхней и нижней границ термоклина, соответственно.

С учетом плотности ρ и теплоемкости c воды верхнего слоя океана можно записать уравнение для температуры T_1 :

$$\rho c h(t) \frac{d\Delta T_1}{dt} = \Delta E - \alpha_1 \Delta T_1 - \kappa \left. \frac{dT_2}{dz} \right|_{z = z_U(x)}$$

где ΔE – радиационное воздействие на поверхность океана, α_1 – коэффициент поверхностного охлаждения.

Парциальное давление CO_2 p_c в верхнем слое над термоклинном является функцией карбонатной системы океана:

$$p_c = C_U / K_0,$$

где K_0 – показатель растворимости CO_2 в морской воде.

С учетом обозначений, принятых на рис. 4, запишем систему балансовых уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = F_2 + F_5 - F_3 - F_6 \\ \frac{dC_U}{dt} = F_3 + F_6 + F_{10} + F_{14} + \frac{z_L}{H}(F_{13} + F_{16} - F_9 - F_{12}) - F_2 - F_{11} \\ \frac{dC_I}{dt} = F_8 + F_{11} \frac{H - z_L}{H}(F_{13} - F_9 - F_{12} + F_{16}) - F_7 - F_{10} \\ \frac{dC_D}{dt} = F_9 + F_8 - F_7 \\ \frac{dC_B}{dt} = F_1 + F_7 - F_4 - F_8 \end{cases}$$

где потоки углерода F_i ($i=1, \dots, 16$) являются функциями биогеохимических процессов, происходящих в различных слоях водной толщи океана. Существуют различные модели этих зависимостей [22].

Поток F_2 аппроксимируем функцией

$$F_2 = \begin{cases} k_2 (p_c - p_a)^{1/2}, & p_a < p_c; \\ \min\{0, q(C_U - \delta C_A)\}, & p_a \geq p_c; \end{cases}$$

где k_2 и q – коэффициенты пропорциональности, зависящие от приземной скорости ветра, δ – константа Освальда (≤ 1.0),

$$p_a = 0,421542 \times 10^{-18} C_A (273,15 + T_A),$$

C_A – масса CO_2 в атмосфере в тоннах, T_A – температура приземной атмосферы в градусах Цельсия.

Вертикальный перенос CO_2 в океане определяется потоками F_{10} и F_{11} . Эти потоки зависят от размеров и плотности частиц органического вещества, плотности и динамической вязкости водной среды. В данной модели будем считать, что адвективный перенос и седиментация вещества из одного слоя океана в другой пропорциональны концентрации углерода в соответствующем слое:

$$F_{10} = \begin{cases} v C_D (H_I - z_U) / (H_D - H_I), & z_U \leq z < H_D; \\ v C_I z_U / (H_I - z_U), & 0 \leq z < z_U; \end{cases}$$

$$F_{11} = \begin{cases} (C_U / R)(z_U / [H_I - z_U]), & 0 \leq z < z_U; \\ (C_I / R)(H_I - z_U) / (H_D - H_I), & z_U \leq z \leq H_D; \end{cases}$$

где R – сила сопротивления среды, v - характеристная скорость адвекции.

Потоки углерода в придонном слое океана за счет выпадения в донные отложения и их растворения опишем простыми соотношениями: $F_7 = \lambda_7 C_D$ и $F_8 = \lambda_8 C_B$, где λ_7 и λ_8 – константы.

Поверхностные слои океана пополняются углеродом за счет речного W_R и подземного W_U стоков с суши: $F_{14} = \lambda_{14} W_R$ и $F_{15} = \lambda_{15} W_U$, где λ_{14} и λ_{15} – содержание углерода в соответствующих водах.

Одним из важных элементов круговорота углерода в океане является фотосинтез: $F_{12} = \lambda_{12} R_\phi$, где λ_{12} – показатель содержания углерода в биомассе фитопланктона, R_ϕ - скорость фотосинтеза. Скорость фотосинтеза на глубине z зависит от температуры воды T_W , концентрации биогенных элементов n и биомассы фитопланктона C_ϕ , а также от других факторов. Для выражения этой зависимости привлекаются различные уравнения, которые в той или иной форме отражают лимитирующую роль таких элементов, как освещенность, концентрация биогенных элементов и биомасса фитопланктона. Учитывая, что $\partial C_\phi / C_\phi \partial z \rightarrow 0$ при $n \rightarrow 0$ и $\partial C_\phi / C_\phi \partial z \rightarrow \text{const}$ с ростом n , примем за основу следующую функцию для описания интенсивности фотосинтеза на глубине z :

$$R_\phi(\phi, \lambda, z, t) = k_0(T_W) K_T f_2(C_\phi) f_3(n)$$

где

$$K_T = A f_1(E), A = k A_{max} / E_{max}, f_1(E) = E \cdot \exp[m(1 - E/E_{max})],$$

$$f_2(C_\phi) = [1 - \exp\{-\gamma_1 C_\phi\}], f_3(n) = [1 - \exp\{-\gamma_2 n\}]^0,$$

k - коэффициент пропорциональности, E – уровень освещенности, $k_0(T_W)$ - функция, характеризующая зависимость скорости фотосинтеза от температуры воды T_W , A_{max} - ассимиляционное число в области максимального фотосинтеза (прирост на единицу веса фитопланктонных организмов); $\gamma_1, \gamma_2, \theta$ и m - константы, выбор которых может определять видовые характеристики элементов фитопланктона. Для A_{max} справедлива оценка: $A_{max} = 5,94 E_{max}$ в области максимального фотосинтеза и $2,69 E_{max}$ для других областей. Согласно этой оценке ассимиляционное число тропического фитопланктона в области максимального фотосинтеза в среднем составляет около 11-12 мгС/час. Так для Перуанского апвеллинга $A_{max} = 6,25$ мгС/час. При этом световое насыщение фотосинтеза в экваториальных районах достигается при $9 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Относительно зависимости $k_0(T_W)$ известно, что удельная интенсивность фотосинтеза фитопланктона с изменением температуры от низкой к более высокой сначала возрастает, достигая в некотором диапазоне оптимальных для фитопланктона температур наивысшего значения, а затем с дальнейшим повышением температуры начинает падать. В окрестности максимума часто используется следующая аппроксимация:

$$k_0(T_W) = \exp\{(T_W - T_{W,opt}) \ln(\theta_0)\}, 0 < \theta_0 \leq 2.$$

Зависимость скорости фотосинтеза от концентрации биогенных элементов $n(\varphi, \lambda, z, t)$ (фосфора, кремния, азота и др. солей), выраженная в формуле (1) экспоненциальным членом, безусловно, является более сложной. Биогенные элементы являются одним из важнейших звеньев экосистемы, так как именно они регулируют поток энергии в ней. Запасы биогенных элементов расходуются в процессе фотосинтеза со скоростью R_n , обычно аппроксимируемой выражением $R_n = \delta_\phi R_\phi$, где δ_ϕ - коэффициент пропорциональности. Пополнение запасов биогенных элементов происходит за счет их выноса при подъеме глубинных вод, где их запасы формируются в результате химических процессов разложения мертвого органического вещества. Процесс разложения мертвого органического вещества контролируется гаммой абиотических условий, характерных для различных климатических зон Мирового океана. Вертикальный поток биогенных элементов определяется условиями перемешивания вод. В тропических зонах, где вертикальная структура вод имеет ярко выраженную трехслойную конфигурацию с наличием слоя с резким скачком температуры (слой термоклина), вертикальное движение биогенных элементов ограничено этим слоем. В тех акваториях, где термоклин распространяется на глубинах 40-100 м, верхний слой обычно обеднен биогенными элементами и их поступление в этот слой происходит лишь в зонах апвеллингов. В этом случае средняя скорость вертикального подъема воды под термоклинном колеблется в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} см/с, а в зонах апвеллинга (прорыва термоклина) она может достигать величины 0,1 см/с.

В качестве основного предположения принимается, что в экосистеме единственным первоисточником энергии и вещества для всех форм жизни служит энергия солнечной радиации (E). Согласно многочисленным теоретическим и экспериментальным исследованиям проникновение солнечного света в глубокие слои океана подчинено экспоненциальному закону:

$$E = uE_0 \exp \left[-\int_0^z \{ \delta C_\phi(x, y, w, t) + \beta C_{DT}(x, y, w, t) + \nu C_L(x, y, w, t) \} dw - \alpha z \right] + (1-u)E_0 \exp(-\zeta z)$$

где $E_0 = E(x, y, 0, t)$ - освещенность на поверхности океана, α - коэффициент поглощения света фильтрованной морской водой; δ , β и ν - коэффициенты погашения света за счет затенения фитопланктоном (C_ϕ), детритом (C_{DT}) и зоопланктоном (C_L) соответственно; u и ζ - параметры, подбираемые в конкретной ситуации с целью наилучшего приближения $E(x, y, z, t)$ к реальной картине изменения освещенности с глубиной. Заметим, что здесь влияние биомассы высоких трофических уровней на прозрачность воды считается пренебрежимо малым.

Освещенность влияет на скорость фотосинтеза R_ϕ . Известно, что R_ϕ как функция E имеет максимум при некотором оптимальном значении E_{max} , убывая при увеличении и уменьшении освещенности от этого критического значения. Максимум R_ϕ на различных широтах φ располагается на глубинах, изменяющихся в зависимости от сезона года (т.е. от высоты солнца). Так в тропических зонах эта изменчивость положения максимума фотосинтеза с глубиной наиболее заметна. Среднее положение максимума фотосинтеза находится на глубинах 10-30 м, а в открытых акваториях он может наблюдаться на глубинах ниже 30 м. Здесь $E_{max} = 65-85$ кал.·см⁻²·сут⁻¹. Начиная с глубин, где $E = 20-25$ кал.·см⁻²·сут⁻¹, фотосинтез

уменьшается пропорционально E . Явное угнетение фитопланктона светом наблюдается при $E > 100 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Эти оценки оказываются другими в северных широтах, где максимум фотосинтеза, как правило, располагается на поверхности.

Приток углерода за счет процесса разложения детрита опишем функциями F_9 и F_{13} , которые отражают скорости разложения детрита в фотическом слое океана и его глубоких слоях с учетом удельной скорости его разложения:

$$F_{13}(z) = \lambda_{13} C_{DT}(t - \tau, z), \quad 0 \leq z < H_i; \quad F_9 = (1 - \lambda_{13}) C_{DT}(t - \tau, z), \quad z \geq H_i; \quad \lambda_{13} = C_{DT} / [C_L + C_\Phi], \quad t = x/v_U,$$

где v_U – скорость удаления водной массы от начальной зоны апвеллинга.

С учетом схемы рис. 2 запишем балансовые уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_\Phi}{\partial x} = \lambda_{12} R_\Phi - T_\Phi - M_\Phi - c_{\Phi L} R_L; \\ \frac{\partial C_L}{\partial x} = \lambda_L R_L - T_L - M_L; \\ \frac{\partial C_{DT}}{\partial x} = M_\Phi + M_L - \lambda_{DT} C_{DT}; \end{cases}$$

где $T_\Phi = t_\Phi C_\Phi$, $T_L = t_L C_L$, $M_\Phi = \max\{0, \mu_\Phi (C_\Phi - C_{\Phi \min})^\theta\}$, $M_L = (\mu_L + \mu_{L1} C_L) C_L$, $R_L = k_L (1 - \exp[-\gamma \bar{C}_\Phi])$, $\bar{C}_\Phi = \max\{0, C_\Phi - C_{\Phi \min}\}$, $C_{\Phi \min}$ – минимальная доступная для потребления трофическими уровнями концентрация фитопланктона, γ – коэффициент характерного уровня голодания зоопланктона, k_L – максимальная величина рациона зоопланктона при избытке биомассы фитопланктона, t_Φ – удельные затраты на дыхание клеток фитопланктона, t_L – удельные затраты зоопланктона на энергетический обмен со средой.

Вклад метаболических процессов в фотической зоне океана представлен потоком $F_{16} = T_\Phi + T_L$. Поток $F_4 = \lambda_4 C_B$ отражает количество углерода, поступающего в донные отложения. Потоки F_1 и F_5 считаются заданными. Поток F_6 рассчитывается моделью наземной растительности [22].

Результаты моделирования

Таким образом, замыкание потоков углерода в окружающей среде с помощью схемы рис. 1 открывает возможность для дальнейших целенаправленных исследований глобального круговорота углерода и повышения достоверности в прогнозах парникового эффекта.

По имеющимся предварительным расчетам роли наземных экосистем и Мирового океана в поглощении атмосферного CO_2 выражаются потоками 0.7 ± 1.0 и 2.4 ± 0.3 ГтС/год соответственно, а сток в геосферный резервуар равен 1.8 ± 0.7 ГтС/год. С ростом атмосферной концентрации CO_2 ожидается повышение роли наземной биоты и снижение потока углерода на границе *атмосфера-океан*. Геосферный сток углерода слабо зависит от климатических параметров и проявляет высокую инерционность. Также в последующем необходимо учитывать различие резервуаров углерода по характеристикам его подвижности и принимать во внимание механизмы самоорганизации глобального круговорота углерода. К сожалению GCP не предусматривает изучение подобных механизмов захоронения углерода, а это означает, что глобальный проект в очередной раз не

даст желаемых результатов. В тоже время предлагаемая здесь схема позволяет максимально учесть все аспекты изменчивости глобального круговорота углерода и отразить его взаимосвязь с круговоротами других химических веществ [2, 10].

Численные эксперименты требуют введения определенных предположений относительно функциональных представлений потоков углерода как функций характеристик окружающей среды и задания сценариев антропогенной активности и климатических трендов. Дополнительно к уже ранее введенным в табл. 1 параметризациям потоков определим $H_{LG} = C_B / \tau_{BG}$, $H_{GA} = C_G / \tau_{GA}$, где C_B и C_G - запасы углерода в биосфере ($4 \cdot 10^{19}$ г.С) и геосфере ($1 \cdot 10^{23}$ г.С) соответственно, τ_{BG} и τ_{GA} - время жизни углерода в биосфере (600 лет) и геосфере (1.3 млн. лет) соответственно.

Результаты моделирования приведены на рис. 3-5. Видно, что с возрастанием антропогенной нагрузки на глобальный круговорот углерода стабилизирующая роль биосферы сохраняется даже при увеличении к 2020 г. промышленных выбросов углерода в атмосферу в три раза по сравнению с современным периодом. Детальный анализ соотношения потоков углерода показывает, что эта стабилизация достигается в основном увеличением потоков H_{LG} , H_{AL}^2 и H_{AU} . Отсюда следует, что для сохранения равновесия климатической системы необходимо предотвратить нарастание процессов обезлесивания и загрязнения Мирового океана, особенно в высоких широтах (рис. 4). Результаты расчетов потока F_3 приведены на рис. 5

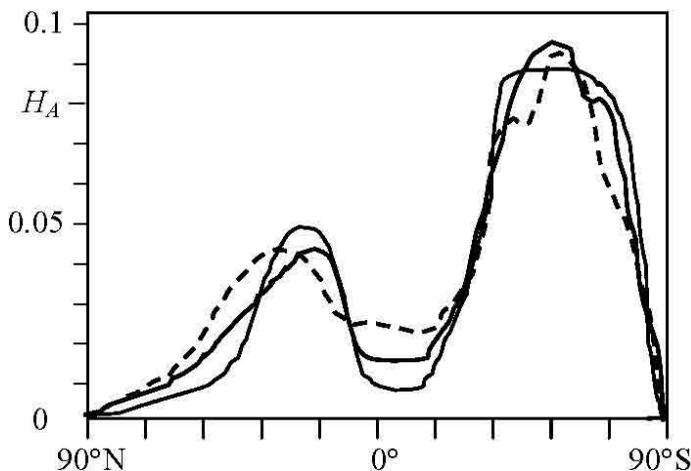


Рис. 3. Усредненные по долготе скорости поглощения атмосферного CO₂ наземными и океанскими экосистемами при трех сценариях антропогенной эмиссии углерода: 6,8 ГтС/год (пунктирная кривая, 2004 г.), 10 ГтС/год (жирная сплошная кривая, прогноз на 2020 г.) и 20 ГтС/год (тонкая сплошная кривая, прогноз на 2020 г.). Обозначение:

$$H_A = H_{AU} + H_{AL}^2 + H_{AL}^1 - H_{UA} - H_{LA}^1 - H_{LA}^2 - H_{LA}^5.$$

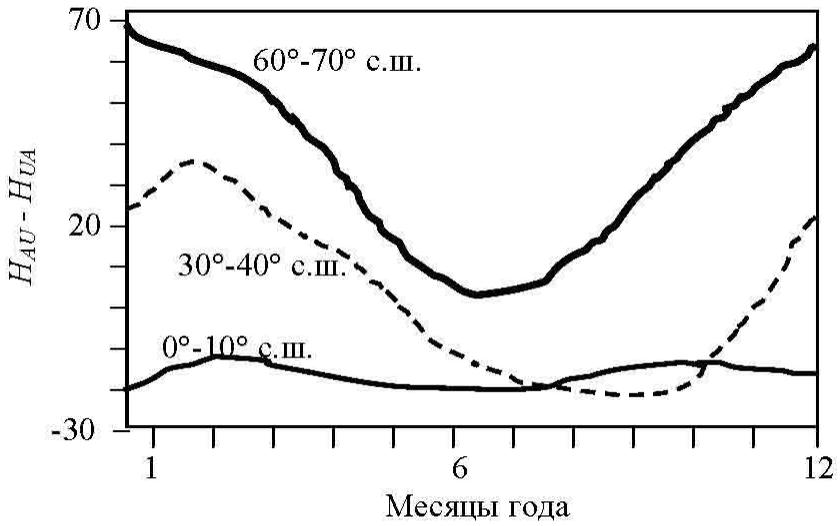


Рис.4. Годовое распределение потока углерода через границу атмосфера-океан в различных широтных зонах.

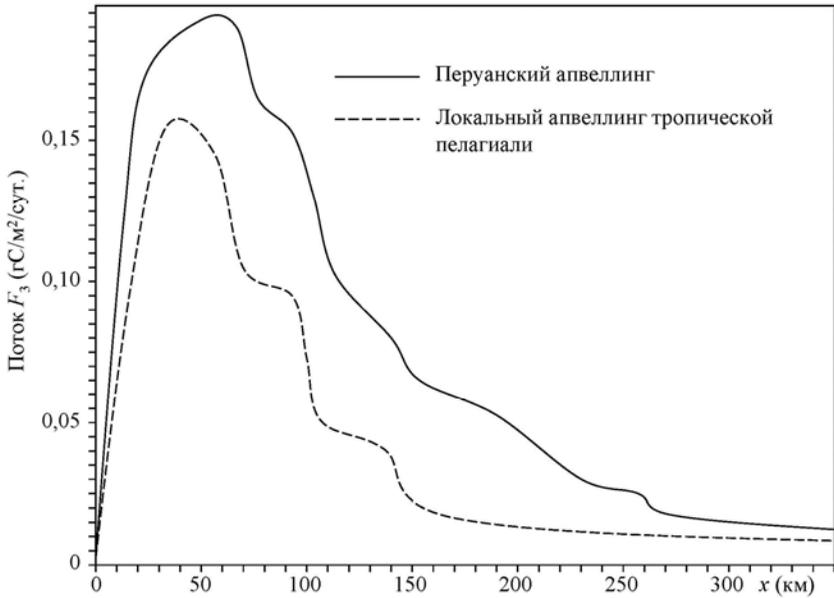


Рис. 5. Динамика потока поглощаемого CO_2 из атмосферы в зоне апвеллинга.

Заключение

Как уже неоднократно отмечалось, что внимание к проблеме углекислого газа и другим малым газовым составляющим атмосферы вызвано в основном беспокойством ученых, экономистов и политиков возможными последствиями ожидаемого изменения климата. Поскольку сжигание ископаемого топлива и обезлесивание поверхности суши являются наиболее значимыми источниками антропогенного возрастания концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере, то именно эти газы изучаются наиболее внимательно. Оба эти газа поглощают инфракрасное излучение земной поверхности и поэтому воздействуют на планетарный климат. Возникшая в конце XX столетия перед политиками задача уменьшения этого воздействия нашла решение в виде Протокола Киото. Реальное и объективное решение этой задачи лежит в глубоком изучении биогеохимических круговоротов всех газов, так или иначе связанных с круговоротом углерода. Именно на таком подходе сосредоточено внимание Проекта GCP, который нацелен на комплексный анализ имеющихся данных о круговороте углерода в окружающей среде и на проведение необходимых измерений. Проект объединяет усилия Международной геосферно-биосферной программы (IGBP), Международной программы по изучению человеческого фактора в глобальном изменении окружающей среды (IHDP) и Всемирной программы изучения климата (WCRP). Круговорот углерода рассматривается как центральный круговорот земной системы, связанный с климатом, круговоротом воды, круговоротами биогенных солей и производством биомассы за счет фотосинтеза на суше и в океанах. Участие человеческого фактора в круговороте углерода определяется факторами производства пищи и формирования условий среды обитания. Однако, Проект GCP не учитывает роль малоподвижного углерода и геосферных процессов в регулировании сбалансированного сочетания потоков углерода на Земле, без чего невозможно оценить роль тех или иных процессов в формировании климата. Предложенная в данной работе структура модели глобального круговорота углерода открывает возможность для более комплексного изучения динамики его потоков между его резервуарами.

Рассмотренная здесь модель позволяет уточнить роль Мирового океана в поглощении CO_2 из атмосферы. Для этого необходимо рассмотреть всю совокупность апвеллингов, структура которой во многом зависит от поля ветра. Безусловно, решение этой задачи потребует детального описания вихрей, потоков и фронтов. Понимание связи апвеллинговых зон с крупно-масштабными и мезомасштабными течениями возможно с помощью соответствующих моделей. Как результат, исследование механизмов и процессов, влияющих на обмен CO_2 между океаном и атмосферой, возможно с помощью глобальной модели системы климат-биосфера-общество.

Ясно, что процессы, обеспечивающие выведение CO_2 из атмосферы, зависят от большого количества физических, химических и биологических факторов, оценки параметров которых требуют кропотливых экспериментальных исследований. Имеющиеся модели с учетом этих факторов могут служить основой синтеза блоков глобальной модели климат-биосфера-общество.

Литература

1. Баренбаум А.А. Механизмы самоорганизации при глобальном геохимическом круговороте вещества на Земле // Синергетика.-М.: МГУ. 2000. Т.3. С. 275-295.
2. Баренбаум А.А. Галактика, солнечная система, Земля. - М.: ГЕОС. 2002. 392 с.
3. Баренбаум А.А. Механизм формирования скоплений нефти и газа // Докл. АН. 2004. Т. 399. №6. С. 802-805.
4. Баренбаум А.А., Шиловский А.П., Шиловская Т.И. Антропогенное нефтегазообразование // Актуальные проблемы нефти и газа, 2018, Т. 4, №23. С.30
5. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальные обобщенные модели динамики углекислого газа // Пробл. окр. среды и природных ресурсов. 2003. №12. С. 11-28.
6. Войтов Г.И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах Земли // Журнал Всес. Хим. О-ва им. Д.И. Менделеева. - 1986. Т. 31. №5. С. 533-539.
7. Войтов Г.И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Труды ГИН РАН.- М.: Наука. 1999. Вып. 515. С. 242-251.
8. Дегерменджи А.Г., Барцев С.И. Глобальные малоразмерные модели динамики и устойчивости биосферы. // Пробл. окр. среды и природных ресурсов. 2003. №7. С. 32-49.
9. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Глобальный круговорот углерода и климат // Исследование Земли из космоса. 2003. № 1. С. 3-15.
10. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода.- М.: Физматлит. 2004. 336 с.
11. Корценштейн В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы Земли. - М.: Недра. 1984.
12. Крапивин В.Ф. Парниковый эффект и глобальный биогеохимический цикл углекислого газа // Пробл. окр. среды и природных ресурсов. 2000. № 2. С. 2-18.
13. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды. С.-П.: Изд-во СПб ун-та. 2002. 724 с.
14. Соколов В.А. Геохимия природных газов. - М.: Недра. 1971. 336 с.
15. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. - М.: ООО "Геоинформцентр". 2002. 250 с.
16. V Конгресс нефтегазопромышленников России. - Сб. материалов. Казань: ЗАО "Новое знание". 2004.
17. Caspersen J. P., Pacala S. W., Jenkins J. C., Hurtt G. C., Moorcroft P. R., and Birdsey R. A. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U. S. Forests // Science. 2000. 290(5494): 1148-1151.
18. Charette M. A., Moran S. B., Pike S. M., and Smith J. N. Investigating the carbon cycle in the Gulf of Main using the natural tracer thorium 234 // J. Geophys. Res. 2001. 106(C6): 11,553-11,580.
19. Ciais P. Taking the pulse of the carbon cycle // UHDP Update. 2002. 2: 11-12.
20. Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Hauglustaine D., Megie G., Khatatov B., and Lamarque J.-F. Assimilation of carbon monoxide measured from satellite in a three-dimensional chemistry-transport model // J. Geophys. Res. 2001. 106(14): 15,385-15,394.
21. Collatz G.J., Ribas-Carbo M., Berry J.A. Coupled photosynthesis stomatal conductance model for leaves of C₄ plants // Aust. J. Plant Physiol. 1992. 19: 519-538.

22. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global environmental change: Modelling and Monitoring.- Springer. Berlin. 2002. 319 pp.
23. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. - Springer/PRAXIS. Chichester. U.K. 2003. 343 pp.
24. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A., and Savinikh V.P. Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis. Springer/PRAXIS. Chichester. 2004. 649 pp.
25. Sellers P.J., Randall D.A., Collatz G.J. *et al.* A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation // Journal of Climate. 1996. 9(4): 676-705.
26. Tarko A.M. Analysis of Global and Regional Changes in Biogeochemical Carbon Cycle: A Spatially Distributed Model. - Interim Report. IR-03-041. IIASA. Laxenburg. Austria. 2003. 28 pp.
27. Wange G. and Archer D.J. Evaporation of groundwater from arid playas measured by C-band SAR // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. 2003. 41(7): 1641-1650.

ОХРАНА И УЛУЧШЕНИЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-02-3

УДК 502/504 (1-21)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

К.Г.-м.н. **Е.П. Янин**

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
yanin@geokhi.ru

Интенсивность многолетнего техногенного воздействия и пространственная картина распространения загрязняющих веществ в городах особенно четко ус- танавливаются по химическому составу и геохимическим свойствам почв, яв- ляющихся относительно консервативным компонентом городских ландшафтов. В почвах формируются техногенные геохимические аномалии, характеризующие зоны техногенного загрязнения, где концентрации поллютантов нередко дости- гают опасных для живых организмов уровней. Почвы, являясь базовым компо- нентом городской экосистемы, одновременно играют роль потенциального вто- ричного источника загрязнения городской среды.

Введение

Город отличается от природных экосистем гораздо более интенсивным мета- болизмом на единицу площади, большим притоком концентрированной энергии, поступающей главным образом в виде горючих ископаемых, большими потреб- ностями в поступлении веществ извне (пища, вода, другие материалы), более мощным потоком отходов жизни, многие из которых намного токсичнее, чем естественное сырье, а также ярко выраженным разорванным циклом химических элементов. Именно в городе наиболее проявлен закон развития системы за счет окружающей среды. Именно город характеризуется ярким выражением двух яв- лений техногенеза: концентрированием значительных масс химических веществ и их рассеиванием. Именно для городских территорий типично явление, назван- ное В.А. Ковдой патологией почв [34]. Масштабы развития городских почв уже достаточно велики. Так, согласно классификации ФАО, имеется 4 основных кате- гории используемых земель: пашни, пастбища, леса и земли общего пользования (включая неиспользуемые земли в городах, бросовые земли и пустоши). Послед- няя категория охватывает около 1/3 земной поверхности, т. е. порядка 4373 млн. га, из которых более 3000 млн. га подвержены негативному воздействию различ- ных химических элементов и веществ [138]. В середине 1970-х гг. площадь миро- вых земель, занятых городами, оценивалась примерно в 150 млн. га [79]; в Герма- нии было застроено более 11% территории страны, в Великобритании – 12%, в Нидерландах – около 14%, в Дании – 5%, в Польше – 0,4 млн. га, в Аргентине – более 0,5 млн. га, в Австралии – 0,7 млн. га [3]. В США урбанизировано 14 млн.

га; по данным [132], городская Америка занимает 3% (240000 км²) территории страны, причем строительство и урбанизация дает ежегодный прирост в 4000 км².

Техногенные потоки вещества, образующиеся в городах, характеризуются высокими концентрациями многих химических элементов и их соединений, что обуславливает формирование специфических эколого-геохимических условий, неизвестных до недавнего времени в природе [64, 66, 90, 108, 111]. Во многом это проявляется в образовании в почвах техногенных геохимических аномалий, выраженных в виде взаимоувязанных в пространстве зон повышенных и очень высоких концентраций поллютантов, нередко достигающих уровней, опасных для человека. Городские почвы, являясь базовым компонентом городской экосистемы, выполняют также функцию своеобразного биогеохимического барьера на пути миграции загрязняющих вещества из атмосферы в грунтовые воды и поверхностные водоемы и одновременно играют роль потенциального вторичного источника загрязнения

1. Общая характеристика городских почв

Городские почвы стали объектом детальных научных и особенно прикладных исследований главным образом в конце 1960-х – начале 1970-х гг. Основные работы были посвящены оценке почв как индикаторов загрязнения атмосферного воздуха в городах, как своеобразного планшета, депонирующего поллютанты, а также установлению особенностей концентрирования и поведения различных загрязняющих веществ (особенно тяжелых металлов) в почвенном профиле [61, 68–72, 115, 116, 118, 119, 123, 126, 139, 137, 139]. Широкое развитие получило геохимическое картирование почвенного покрова городов для установления пространственной структуры техногенного загрязнения и выявления зон влияния конкретных источников воздействия [61–65, 68, 69, 127, 134].

В общем случае неблагоприятные воздействия на почву, свойственные городским поселениям, можно разделить на несколько типов: 1) физические – эрозия, переуплотнение корнеобитаемого слоя, захламенение поверхности, высокая каменистость, что проявляется в изменении гумусового горизонта, нарушении почвенного профиля, его оглеении; 2) биологические – нарушение оптимального соотношения и уменьшение видового разнообразия микрофлоры и почвенной мезофауны, загрязнение почвы патогенными микроорганизмами, ухудшение санитарно-эпидемиологических показателей; 3) химические – поступление и накопление различных поллютантов, изменение рН, уменьшение емкости поглощения, уменьшение содержания гумуса и рост количества техногенной органики. Для территорий городов свойственны такие явления, как увеличение так называемой «запечатанности» почвенного покрова, засыпка или срезание верхнего горизонта и т. д. В конечном счете в городах формируются искусственные почвоподобные тела, для которых характерен верхний слой, созданный человеком (мощностью до 50 см и больше). Считается, что главными диагностическими признаками городских почв являются: сдвиг рН в щелочную сторону, обогащенность основными элементами питания, повышенная плотность, каменистость, специфический водный, газовый и температурный режимы, что приводит к нарушению многих экологических функций, выполняемых почвой в природных экосистемах.

Техногенез справедливо рассматривается как ведущий фактор почвообразования [15]. Техногенно трансформированные почвы уже настолько широко распространены, а изменения их часто так существенны, что возникло представление о

специфическом почвообразовании – технопедогенезе, т. е. почвообразовательном процессе, особенности которого в той или иной мере предопределены техногенными факторами (действующими или действовавшими) [18]. Особенно интенсивно технопедогенез проявлен в городах и городских агломерациях. В настоящее время здесь на фоне различных строений и сооружений, асфальтированных автострад, улиц и площадей распространены не только естественные, но и различные по степени техногенной трансформации преобразованные почвы и искусственно созданные почвоподобные образования, в ряде классификаций получившие название – в зависимости от происхождения и свойств – антропоземов, техноземов, культуроземов, урбаноземов [23, 33, 39, 82]. Авторы [13] предлагают различать четыре основных сообщества почв: 1) природные почвы; 2) техногенно-природные почвы; 3) природно-техногенные почвы; 4) техноземы. Примерами техноземов (полностью техногенных почв) служат искусственные почво-грунты, грунто-смеси на территории промышленных предприятий, шахт, рудников и т. п. Остальные группы почв отражают большую (природно-техногенные) или меньшую (техногенно-природные) степень преобразования их исходных типов техногенными процессами. Существуют более детальные систематики техногенных (антропогенных) почв, в которых присутствуют не только почвы (естественные, антропогенно-измененные, антропогенно-созданные), но и непочвенные поверхностные образования (как естественного, так и искусственного происхождения) [54]. В англоязычной литературе техногенные почвы часто именуется антропоосолями, или антросолями, т. е. почвами, исходные свойства которых претерпели глубокие изменения в результате деятельности человека [41]. Особую разновидность представляют собой городские почвы под асфальтобетонными покрытиями, присутствующие в ряде европейских и североамериканских классификациях под названием *sealed soil* («запечатанные почвы, почвы закрытых поверхностей») [57]. Как правило, такие почвы характеризуются меньшим уровнем загрязнения и очень специфичным режимом. Считается, что они выполняют функцию сохранения информации о развитии природной среды и истории ее изменения человеком, поскольку в них разнородность культурного слоя проявляется более отчетливо, тогда как в «открытых» почвах различия нивелируются за счет более активного перераспределения химических веществ. В частности, запечатанность почв в пределах Садового кольца Москвы достигает 80–90% площади, территорий промзон – до 80%. Почвы под жилой застройкой различаются по степени запечатанности от 20 до 70% [86].

В литературе справедливо подчеркивается, что, с одной стороны, существующие классификации естественных почв практически неприменимы для анализа их городских аналогов; с другой – отмечается, что городские почвы (как реальное геологическое тело) изучены еще недостаточно полно, их систематика находится в стадии становления, а дальнейшее развитие системы их классификации требует проведения разнообразных по содержанию исследований [53, 58, 80, 130]. Судя по всему, основным отличием городских почв от почв характерных для данной природной зоны является наличие почвенного горизонта «урбик» (от латинских слов *urbis, urbanus* – город), представляющего собой поверхностный насыпной, перемешанный горизонт, часть культурного слоя с примесью урбантропогенных включений (строительно-бытового мусора, промышленных отходов). Его верхняя часть более или менее прогумусирована в зависимости от функциональной принадлежности территория (промышленная зона, жилые зоны, парки и скверы) и возраста. К отличительным характеристикам такого антропогенно созданного

горизонта относятся: повышенное содержание фосфора и других питательных элементов, присутствие большого количества карбонатов, местами признаки засоления, высокое содержание микроэлементов, иначе называемых тяжелые металлы, повышенная уплотненность. В горизонт урбик вошел также материал природных почв.

К настоящему времени установлено, что городские почвы обладают специфическими морфологическими, литологическими, физико-химическими, геохимическими и биологическими свойствами, отличаются своеобразием поведения многих химических элементов и их соединений, с этой точки зрения отличаясь от своих зональных (естественных) аналогов. В большинстве случаев городские почвы характеризуются увеличением уплотнения, объемной массы, содержания тонкодисперсных (глинистых) фракций и гумуса (в составе которого, как правило, преобладают гуминовые кислоты, способные, как известно, формировать с металлами более устойчивые комплексы, нежели фульвокислоты), а также органики техногенного происхождения (битумно-асфальтовые смеси, сажа и т. д.); в почвах наблюдаются заметные изменения каталазной активности и структуры почвенных горизонтов в сторону слоистости, происходит активное формирование, в одних случаях, крупнопластинчатых отдельных, в других – пылеватых агрегатов [5, 6, 19, 21, 49, 59, 74, 85]. Массовое применение в городах противогололедных солей приводит к засолению почв, которые в отдельных случаях переходят даже в категорию солончаковых [5, 48, 83]. Металлы способствуют значимому снижению электрокинетического потенциала илистой фракции почв по сравнению с контролем и взаимодействуют в основном с органическим веществом почв [81]. Загрязненные почво-грунты характеризуются специфическими физическими (плотность, электрические свойства, диэлектрические свойства, теплофизические свойства, магнитные свойства, фильтрационные свойства), физико-химическими (растворимость поллютантов, электроповерхностные свойства, сорбционная способность, диффузионные свойства, лиофильность, лиофобность, капиллярные свойства, коррозионные свойства, набухаемость) и физико-механическими (деформируемость, прочность, реологические свойства) свойствами [36]. В городских грунтах в условиях техногенеза формируются аномальные агрессивные среды по отношению к различным железобетонным и чугунным конструкциям [44]. Наиболее глубоко преобразованные или полностью искусственные городские почвы состоят из гетерогенной смеси собственно почвенных и непочвенных материалов [130]. В определенных условиях в городских почвах формируется сероводородная среда, где многие металлы образуют сульфиды [59]. Почвы придорожных городских газонов характеризуются повышенным количеством пылеватых частиц, высокой емкостью поглощения, преобладанием в составе обменных катионов кальция [40], а почвы вблизи мусоросборников, на территории дворов, в местах выгула домашних животных загрязнены возбудителями кишечных паразитных заболеваний [60]. Культурные слои и почвогрунты городов характеризуются специфическими петрографическими и минералогическими свойствами [29–31]. В них присутствуют различные аутигенные минералы – карбонаты (кальцит), фосфаты железа (вивианит и его модификации – керченит и боспорит), кальциевые фосфаты (курскит, подолит), сульфиды (пирит и марказит), кристаллические формы оксидов и гидрооксидов железа (гетит, гидрогетит, гематит, лепидокрокит и др.). Подавляющее большинство минералов имеет хорошо выраженный кристаллический габитус, что свидетельствует о благоприятных условиях для образования.

Загрязнение почвы тяжелыми металлами способствует изменению условий развития почвенных микроорганизмов. Это приводит не только к снижению общей численности последних, но и к нарушению гомеостаза структуры микробных сообществ, к сужению биологического разнообразия почвенных микроорганизмов, которое в значительной мере определяет стабильность данной экосистемы [84]. Все это, в конечном счете, снижает самоочищающую способность почв и увеличивает их экотоксичность. Известно, что почвенная биота оказывает значимое влияние на процессы миграции и трансформации металлов и особенно органических поллютантов в почвах. Наиболее чувствительны к воздействию тяжелых металлов азотфиксирующие и нитрифицирующие бактерии, целлюлозолитические бактерии, цианобактерии. Интенсивное накопление металлов в почвах вызывает сильное изменение структуры комплекса микроскопических грибов, вплоть до появления видов, не типичных для фоновых почв данного природного региона [43]. Видовое разнообразие уменьшается обычно за счет редко встречающихся видов грибов. При этом виды, характерные для сильно загрязненных (дерново-подзолистых) почв, обладали высокой фитотоксической активностью. В то же время определенные виды микроскопических грибов очень устойчивы к воздействию тяжелых металлов [22, 46].

2. Химический состав городских почв и особенности его формирования

Существенная доля загрязняющих веществ поступает в атмосферу городов в составе выбросов различных предприятий и автотранспорта, а также в составе различных твердых отходов. Особенно важную роль играет поступление поллютантов в составе промышленной пыли [94, 104, 107, 113] (табл. 1, рис. 1). Некоторые химические элементы поступают в атмосферу в газообразном состоянии.

Распространение поллютантов в атмосфере от источника их поставки по направлению ветра является начальным этапом процесса загрязнения атмосферного воздуха. По мнению Э. Робинсона [25], существует несколько стадий развития данного процесса, которые совместно составляют атмосферный цикл. С этой точки зрения, считает автор цитируемой работы, важными являются следующие явления:

1) начальное разбавление загрязняющих веществ во время их подъема в слой воздуха, в котором осуществляется их адвекция, что в существенной мере зависит от характеристик источника эмиссии;

2) разбавление за счет процессов турбулентной диффузии при переносе непосредственно в районе расположения источника;

3) дальний перенос поллютантов от источника в массе воздуха и разбавление воздушной массы за счет процессов турбулентной диффузии и эффектов ветрового сдвига между слоями загрязненного воздуха;

4) реакции загрязняющих веществ в атмосфере, приводящие к образованию вторичного загрязнения и увеличению концентрации поллютантов в атмосфере;

5) процессы выведения загрязняющих веществ из атмосферы, приводящие к ускорению образования атмосферных осадков, химические реакции в атмосферных каплях, механизмы поступления (осаждения) поллютантов на подстилающую поверхность;

6) сухое выпадение, химическая трансформация поллютантов во время их переноса к поверхности Земли.

**Геохимические ассоциации в пыли электротехнических предприятий
г. Саранска [91, 94, 104]**

Завод	Пыль*	Порядок значений коэффициентов концентрации относительно содержания в фоновых почвах					
		> 300	300–100	100–30	30–10	10–3	3–1,5
Электроламповый	1	Sb-Cd	Hg-W	Pb-Sn-Ba-As	Zn-Mo-Cu-Sr-Ge	Mn-Cr-Ag	Co-B-V-Ni
	2	–	–	Pb	Hg	Zn-Cd-Cu	–
	3	Cd	Pb-Cu	Hg	Zn	Mn	–
Специальных источников света и электростекла	1	Cu	B-Ag	Pb-Zn-	Sb-W-Bi-Cr	Ni-Cd-Mo-Co-Hg-Mn-	Ge-V-Sn-Ti-
	2	Cu	Ag-Pb	Cr-Zn	Sb-Ba-Mo-Ni	Hg-Cd-Co-W-Sn-Mn	B-V-Ge-Ti-Sr
	3	Pb	-	W	Sb-Bi	Zn-Hg-B-Cu-Ga-Co-Ag-V	Mo-Sn-Ni-Ti-Cr
Электровыпрямитель	1	–	–	Cd-Mo-Cu	Cr-Pb-Co-Ni	Ag-Zn	Mn
	3	–	–	Pb-Mo-Zn-Cd	–	Cu-Cr-Fe	Co
Силовой электроники	1	Cd	–	Pb-Mo	–	Cr-Cu-Zn-Ag	Co
	3	Ag	Mo	Cd-Zn-Pb	Cu	Cr-Fe	Co
Силовых преобразователей	1	–	–	Cu	Cd-Ag	Zn-Ni-Co-Mo-Cr-Mn	Pb
	3	–	–	Cd-Pb	–	Zn	Cu-Fe-Cr
Кабельный	2	Cu-Sn	Pb-Sb-Cd	Zn	Ag-Bi-W	Mo-Hg-Cr-Ni	Ba
	3	–	Cu-W-Pb-Sn	Sb	Bi-Zn-Ag	Mo-Hg	Co-Cr-Ba

* 1 – технологическая, 2 – вентиляционная, 3 – пылесметы из рабочих помещений.

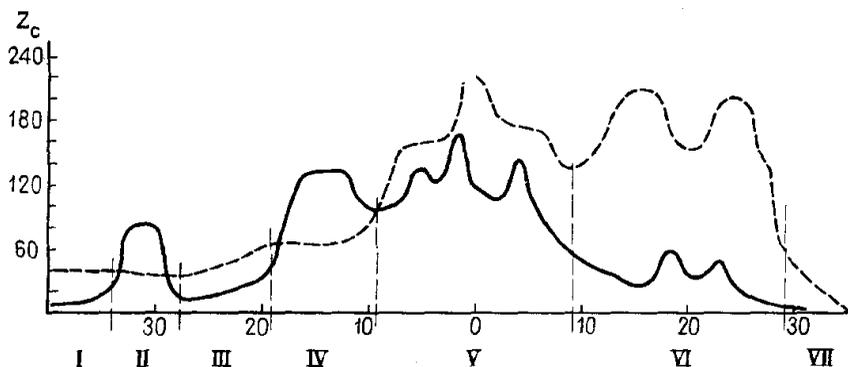


Рис. 1. Характерный геохимический профиль через крупную урбанизированную территорию [66]: I, III, VII – фоновые территории; II – освоенная свалка; IV – промышленный район; V – давно сложившийся промышленный район; VI – новый промышленный район; Z_c – суммарный показатель загрязнения: сплошная линия – распределение его значений в выпадениях из атмосферы, пунктир – то же в почвах.

В общем случае поступление, перенос, время пребывания и особенности осаждения пыли в атмосфере в значительной степени зависят от размеров и плотности ее частиц, способов их поступления в среду обитания (в том числе, от высоты заводских труб), а также от скорости и характера перемещения воздушных потоков (воздушной циркуляции). Важную роль в распространении поллютантов в атмосферном воздухе играют физические характеристики источника их поставки. Любое промышленное предприятие с этой точки зрения может рассматриваться в качестве точечного источника загрязнения. В данном случае существуют две проблемы, обусловленные особенностями промышленной зоны [25]: 1) низкая скорость эмиссии поллютантов может привести к опусканию выброса (факела) за трубой, что в существенной мере связано с образованием воздушных вихрей и формированием турбулентности; 2) малая высота трубы или опускание факела может приводить к тому, что поллютанты будут циркулировать в воздушных вихрях с подветренной стороны зданий и определять относительно высокие концентрации у земной поверхности. Таким образом, размеры зон загрязнения определяются концентрацией твердых частиц в выбросах и высотой заводских труб. Естественно, что наиболее высокой реакционной способностью в атмосфере обладают разнообразные газы (диоксид серы, оксиды азота, некоторые соединения фтора, углеводороды). Мелкодисперсные пылевые частицы обычно характеризуются как более консервативные. Тем не менее химические реакции, протекающие в атмосфере, оказывают активное влияние и на физико-химическое преобразование пыли. Многие поллютанты способны растворяться в облачных каплях в процессе образования облаков (так называемое облачное вымывание, которое наиболее эффективно при дальнем переносе загрязняющих веществ, когда они могут попадать в высокие слои атмосферы [25]). Твердые вещества (пыль и аэрозоли твердых частиц), содержащие металлы, выводятся из атмосферы путем мокрого или сухого (гравитационная седиментация) осаждения, в результате диффузии и при налипании на различные предметы. Другим типом выведения поллютантов из атмосферы является процесс подоблачного вымывания, при котором дождевые капли захватывают и сосаждают поллютанты на подстилающую поверхность [120]. Значительное количество пыли (и связанных с ней поллютантов) сосаждается со снегом, формируя в снежном покрове техногенные геохимические аномалии [61, 66].

Для поведения многих загрязняющих веществ в атмосфере важную роль играют процессы образования ядер конденсации. Как правило, в городах в утренние и дневные часы наблюдается усиление деятельности местных ядрообразующих процессов, что ведет к увеличению в воздухе концентрации ядер [20]. Однако одновременно усиливающийся турбулентный обмен вызывает перенос ядер в более высокие слои атмосферы, в связи с чем рост числа ядер в приземном слое воздуха замедляется, достигает максимума (утреннего) и затем переходит в падение; минимум числа ядер имеет место около 16 час., когда интенсивность турбулентного обмена максимальна. Ослабление обмена к концу второй половины дня приводит к скоплению ядер конденсации в приземном слое воздуха, обуславливающему вечерний максимум в суточном ходе их количества. Ночной минимум связан, по-видимому, с общим ослаблением местных ядрообразующих процессов в это время. В солнечные дни абсолютное число ядер конденсации оказывается существенно большим, чем в пасмурные дни.

Скорость и дальность переноса частиц пыли, несущих тяжелые металлы, в значительной степени обуславливаются характером турбулентности воздуха и существующего во время эмиссии поллютантов ветрового поля (его стратифика-

ция и т. п.). В общем случае размеры формирующихся в атмосферном воздухе и в почвах зон техногенного загрязнения определяются как концентрацией твердых части в промышленных выбросах, так и высотой заводских труб. По данным [25], максимальная концентрация поллютантов (речь идет, как правило, о газовой составляющей) в выбросах достигается обычно на расстоянии от источника, которое в 5–20 раз превышает высоту трубы.

При выходе промышленных пылевых выбросов в атмосферу начинается их сепарация, когда более крупные и тяжелые частицы пыли осаждаются вблизи источника. Распределение частиц по размеру и удельной массе нередко означает также и их сепарацию по химическому составу. Обычно частицы диаметром более 20 мкм достаточно быстро выпадают из атмосферы на подстилающую поверхность. Их осаждение происходит гравиметрически и описывается законом Стокса. Как правило, такие частицы, поступающие в атмосферу из различных источников, оседают в течение нескольких часов или суток, но за это время они могут перенестись на значительные расстояния. Частицы, средний диаметр которых равен 10–20 мкм, обычно остаются в атмосфере 1–2 дня перед тем, как поступить на подстилающую поверхность в виде сухих выпадений или с атмосферными осадками. В тропосфере они способны находиться до 5 дней и за это время могут под действием ветра переместиться на 300–350 км [26]. Частицы размером от 1 до 10 мкм, как правило, остаются во взвешенном состоянии в течение нескольких суток. Частицы размером менее 1 мкм в диаметре довольно сходны в своем поведении с газами и в значительно меньшей степени подвержены действию атмосферных осадков; время их пребывания в нижних слоях атмосферы обычно составляет 10–20 дней, а в стратосфере от 1 до 5 лет – достаточно долго, чтобы мигрировать на значительные расстояния, претерпевая определенную модификацию. Значение диаметра в 0,1 мкм является пределом, ниже которого осаждение невозможно из-за броуновского движения (его скорость же превышает скорость осаждения). Тем не менее такие частицы оказываются в почве благодаря атмосферным осадкам и электростатическим явлениям, которые при определенных условиях приводят к их укрупнению. Судя по всему, наиболее существенным для тонких частиц являются процессы сухого выпадения, которые определяются коэффициентом выпадения. Он еще называется скоростью осаждения и представляет собой отношение направленного к земной поверхности потока поллютанта к концентрации последнего в пограничном слое атмосферы, непосредственно над подстилающей поверхностью [120]. Сухое осаждение происходит главным образом вследствие того, что в непосредственной близости к поверхности находится тонкий слой воздуха толщиной 10–100 мкм, который практически неподвижен. Проникающие в него частицы вследствие броуновского движения входят в непосредственный контакт и взаимодействие с подстилающей поверхностью (почвой, растительностью и т. д.) и в результате разнообразных процессов (химических реакций, физической или химической сорбции, гравиметрического осаждения, налипания на твердые предметы) выводятся из указанного пограничного слоя. Моделирование процессов переноса почвенного аэрозоля в конвективном пограничном слое атмосфере показывает, что его перенос в приземном слое атмосферного воздуха в существенной мере определяется процессом сальтации [42].

Необходимо отметить, что в ходе многих производственных процессов создаются такие скорости перемещения воздуха, при которых в движение приходят частицы, обладающими существенными диаметрами. К тому же, в более плотной атмосфере с развитой турбулентностью частицы крупнее 40–60 мкм обычно ведут себя как типичные аэрозольные [55], которые независимо от происхождения

имеют достаточно высокую скорость оседания [7]. Возможно, что именно с ними в значительной мере и связано формирование техногенных геохимических аномалий в почвах промышленных зон.

Результаты двухлетних исследований процессов сухих и влажных осадений в районе известного металлургического комплекса в Садбери (Канада) показали, что большая часть твердых частиц вымывается из шлейфа выбросов дождем и снегом в радиусе 40 км [121, 122]. Выбросы предприятия обуславливали в среднем 70% общих влажных осадений меди и никеля на удалении до 40 км и менее 20% осадения других металлов. Сухое осаждение мало влияло на выведение поллютантов из атмосферного воздуха. В другом исследовании установлено, что не менее 30% пыли, выбрасываемой металлургическим заводом, осаждалось на его территории [37]. По данным [45], в радиусе 1 км от источника загрязнения на почву выпадает 1–3% тяжелых металлов от их общего количества в выбросах. Доля осевшего на почву цинка в радиусе 10 км от цинкоплавильного завода не превышала 10% от его содержания в выбросах, т. е. основной поток металлов активно рассеивается в атмосфере.

Как правило, промышленная пыль обогащена Fe, Ca, Mg и K (табл. 2). По данным [59], промышленная пыль, выпадающая на подстилающую поверхность в г. Ярославле, характеризовалась следующим усредненным составом: CaO – 37,5%, SiO₂ – 26,0, Fe₂O₃ – 14,3, K₂O – 10,8, MgO – 3,5%. В промышленной пыли Коммунарского металлургического комплекса (г. Луганск), содержания которой в воздухе в зависимости от удаленности от последнего составляли от 2,5 до 1,5 мг/м³, присутствовали оксиды железа, марганца, алюминия, кальция, магния, содержащая примеси свинца, цинка, меди и других металлов [1]. Поступление в городскую среду такой пыли, с одной стороны, способствует ожелезнению городских почв, практически не влияющего на щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия миграции химических элементов; с другой – приводит к карбонатизации почв, к увеличению их щелочности, насыщению поглощающего комплекса основаниями, изменению буферности, увеличению поглотительной способности, к связыванию металлов в карбонаты и, в конечном счете, снижению их подвижности [16, 17, 85].

Таблица 2

Макрокомпоненты в пылевых выбросах заводов г. Саранска, % [107]

Завод, предприятие	Fe	CaO	MgO
Инструментальный	56,40	10,10	0,89
Тепловозоремонтный	38,00	4,97	0,73
Авторемонтный	30,30	–	–
Литейный	12,72	0,99	0,44
Механический	12,86	2,83	2,35
Автосамосвалов	10,41	7,75	1,18
Типография	5,52	–	–
Керамический	3,72	–	–
Биохимик	3,70	–	–
Крупнопанельного домостроения	3,63	21,28	2,84
Теплоизоляционных материалов	3,48	17,03	9,45
Электроламповый	3,36	7,95	2,27
Фоновые почвы Мордовии	4,00	0,47	0,70

Почвы городов характеризуется своеобразным и неоднородным в пространстве химическим составом, что относительно редко наблюдается в пределах таких же по площади природных территорий (табл. 3, 4). Они часто содержат большое количество обменных катионов, среди которых преобладает кальций, и характеризуются высокой обогащенностью элементами питания растений (подвижными фосфором и калием). Существование в городах почв, развитых на привнесенных композитных материалах, еще более увеличивает пространственную гетерогенность почвенного покрова городских поселений [124]. В районах с существованием сезонов с устойчивым снежным покровом, последний по отношению к почве является своего рода промежуточной депонирующей средой и играет важную роль в трансформации форм нахождения химических элементов в поступающей пыли и в перераспределении поллютантов в период снеготаяния.

Таблица 3

**Валовый химический состав верхнего слоя почв
в окрестностях г. Темиртау, % [107]**

Компонент	Жилой район города в зоне влияния		Территория химического завода			Орошаемые почвы		Фоновые почвы
	Химического завода	Металлургического завода	Юг	Центр	Север	I	II	
SiO ₂	55,08	54,00	73,61	56,60	49,36	64,55	58,82	56,73
TiO ₂	0,34	0,54	0,28	0,39	0,61	0,59	0,66	0,66
Al ₂ O ₃	7,40	10,00	7,44	8,00	9,57	12,17	11,65	13,00
Fe ₂ O ₃	0,87	4,10	1,46	2,33	3,18	3,98	4,83	4,06
FeO	2,37	1,44	2,16	0,86	1,51	1,44	1,22	1,80
MnO	0,09	0,12	0,09	0,10	0,12	0,11	0,18	0,16
CaO	12,46	6,54	3,86	11,55	8,36	1,52	1,98	3,65
MgO	0,90	1,90	0,80	1,00	1,40	1,70	1,80	2,30
Na ₂ O	1,20	1,20	1,35	1,10	1,05	1,40	1,45	1,00
K ₂ O	1,70	1,95	1,70	1,80	1,95	2,50	2,40	2,35
P ₂ O ₅	0,13	0,17	0,17	0,13	0,15	0,14	0,33	0,11
H ₂ O	0,60	3,04	0,84	1,42	2,60	2,06	2,38	3,58
S	0,12	0,57	0,18	0,20	0,20	0,10	0,12	0,10
ППП	16,86	15,00	5,50	14,13	20,16	7,75	11,66	11,50
CO ₂	8,58	3,08	1,98	7,26	4,62	0,66	0,66	1,72
Фтор	0,09	0,08	0,07	0,12	0,07	0,05	0,08	0,03

Примечание. Общий зональный тип - каштановые почвы; орошаемые почвы: I - выше г. Темиртау (фоновые); II - ниже г. Темиртау (орошаются загрязненными речными водами); PPP - потери при прокаливании.

Анализ жидких и твердых выпадений, проводившийся в различных странах и регионах, показал, что в твердых частицах металлы чаще всего представлены сульфатами, оксидами, сульфидами, карбонатами, иногда галогенидами. Для многих металлов велико значение обменной формы и органических форм (рис. 2). В составе дождевой воды в почвы поступают растворенные формы металлов.

Валовый состав верхнего слоя почв в окрестностях г. Саранска, % [107]

Компонент	Фон	Территория г. Саранска				
		Жилой микрорайон Светотехника	Промзона завода СИС-ЭВС*	Промзона электролампового завода	Вблизи завода Резинотехника	Вблизи городской ТЭЦ
SiO ₂	73,69	73,25	69,43	59,74	65,10	64,56
TiO ₂	0,54	0,42	0,47	0,76	0,56	0,59
Al ₂ O ₃	6,41	6,39	8,23	14,83	10,03	9,29
Fe ₂ O ₃	0,47	0,93	1,14	4,03	3,04	2,77
FeO	2,59	2,08	5,03	1,72	2,15	1,72
MnO	0,20	0,04	0,06	0,09	0,06	0,07
CaO	0,47	0,94	2,20	2,67	1,73	2,04
MgO	0,70	0,90	0,90	1,70	1,10	1,00
Na ₂ O	0,55	0,50	0,40	1,13	0,80	0,70
K ₂ O	1,48	1,43	1,26	2,36	2,31	1,98
P ₂ O ₅	0,14	0,14	0,09	0,19	0,27	0,18
H ₂ O	4,98	1,76	1,84	2,76	2,28	3,16
S _{общая}	< 0,10	0,21	0,20	0,21	< 0,10	< 0,10
ППШ	7,20	10,45	8,18	7,35	10,09	11,41
CO ₂	0,22	0,22	1,32	1,10	0,66	0,44
Фтор	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04

* Завод специальных источников света и электровакуумного стекла.

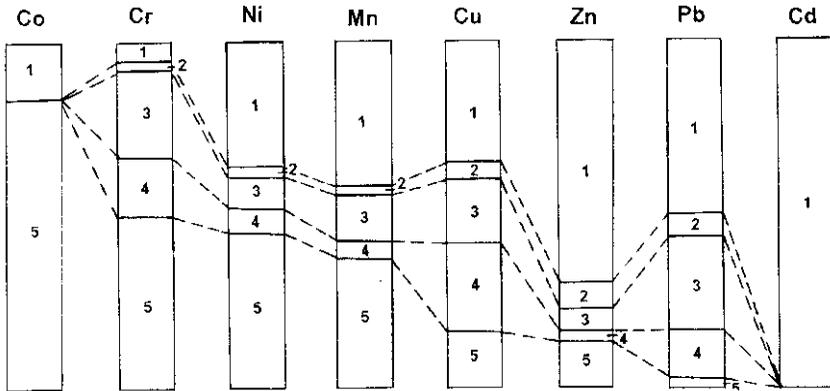


Рис. 2. Формы нахождения металлов в твердых атмосферных частицах [135].

Формы: 1 – обменная, 2 – адсорбированные на поверхности оксидов и карбонатов, 3 – связанные с оксидами железа и марганца, 4 – связанные с органическим веществом, 5 – остаток.

Установлено, что фазовый состав химических элементов в пылевых выбросах, например, предприятий цветной металлургии в целом однотипен и представлен преимущественно оксидами (71–88% от вала). Количество сульфидов и водорастворимых фракций металлов сравнительно невелико (Горбатов, 1983, цит. по [56]). Доля атмосферных выпадений в загрязнении почв никелем составляет (в %) 55, свинца 54, цинка 32, кадмия 30% [131]. За счет внесения навоза в почву поступает 61% меди (от общего содержания), внесения донных осадков гаваней – 66% хрома, 59% ртути, 40% кадмия. Такая же картина загрязнения характерна в целом и для сельскохозяйственных земель за исключением пахотных, где широко используется в качестве удобрений осадок сточных вод, содержащий в своем составе значительное количество тяжелых металлов.

По данным Р.И. Первуниной и С.Г. Малахова [52], в составе пыли, выбрасываемой в атмосферу заводом по выплавке Pb и Zn, преобладали оксиды металлов (свыше 50%). На долю водорастворимой формы Zn и Cd приходилось 6–7%, водорастворимый Pb отсутствовал. Тем не менее, некоторые тяжелые металлы, концентрирующиеся в промышленной пыли, характеризуются относительно высокой долей подвижных форм, извлекаемых ацетатно-аммонийной вытяжкой (табл. 5), что свидетельствует о потенциальной миграционной способности поллютантов в зонах загрязнения.

Таблица 5

Подвижные формы металлов в технологической (1) и вентиляционной (2) пыли завода Специальных источников света и электровакуумного стекла [89]

Металл	Показатель					
	Вал, мг/кг		Ацетатно-аммонийная вытяжка, мг/кг		Доля подвижных форм, %	
	1	2	1	2	1	2
Медь	5300	85	2,86	9,2	0,05	10,8
Кобальт	31	–	2	–	6,45	–
Никель	260	31	16,2	1,2	6,23	3,9
Цинк	3200	460	89,2	271	2,79	58,9
Марганец	1000	660	104,4	16,6	10,44	4,8
Хром	190	92	4,05	16,6	2,13	18
Серебро	–	9	–	0,02	–	0,22
Кадмий	–	3	–	2,78	–	92,6
Свинец	–	1200	–	690	-	57,5

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.

Промышленное воздействие оказывает прямое и косвенное влияние на состав органического вещества почв [10]. Прямое воздействие сказывается при непосредственном поступлении в почву органических соединений промышленных выбросов, их накоплении и последующем взаимодействии с органическим веществом и минеральными компонентами почвы, а также при взаимодействии минеральных промышленных выбросов с органическим веществом почвы и аккумуляровании в ее профиле продуктов такого взаимодействия. Косвенное влияние связано с изменениями качественного и количественного состава почвенной био-

ты, активности биохимических процессов, состава и продуктивности растительного покрова. В условиях техногенного загрязнения происходит трансформация гумусовых кислот (табл. 6). Глубокие изменения в структуре и химическом составе фульвокислот подзолов были обнаружены в зоне влияния завода в Садбери (Канада), где атмосферные осадки имели $pH < 3,0$, а в почвах наблюдались высокие концентрации никеля и меди (табл. 7). Фульвокислоты, формирующиеся в этих почвах, имели низкое содержание углерода и азота и высокую зольность за счет аномально высокого количества серы.

Таблица 6

**Элементный состав и содержание функциональных групп
в гумусовых кислотах в незагрязненных (1) и загрязненных (2) почвах, %
(Krendorff, Schnitzer, 1979, цит. по [10])**

Элемент	Гуминовые кислоты		Фульвокислоты	
	1	2	1	2
C	55,3	54,8	44,9	44,3
H	5,6	6,8	5,7	7,2
N	4,0	8,3	2,5	5,1
S	0,9	2,2	1,7	3,5
O	34,2	27,9	45,2	40,5
Общая кислотность, мг-экв/г	7,6	5,4	10,0	9,6

Таблица 7

**Элементный состав фульвокислот на разном расстоянии от завода, %
(Hutchinson, Whitby, 1977, цит. по [10])**

Элемент	1,6 км	7,4 км	52 км
Зола, %	32,3	5,6	3,8
C	15,9	36,6	43,8
N	0,2	1,7	1,5
H	5,8	5,2	5,3
O	47,5	54,8	48,2
S	30,6	1,7	1,3

В городах с развитым печным (каминным) отоплением в почвах в повышенных количествах накапливаются 3–7-ядерные ПАУ (бенз(а)пирен, пирен, коронен и др.), уровни содержания которых могут в 100 и более раз превышать их уровни в фоновых почвах [50]. При повышенных концентрациях бенз(а)пирена в городских почвах отмечается ингибирование биологической активности (снижение скорости эмиссии CO_2 , снижение каталазной и дегидрогеназной активности) [9, 12]. При загрязнении почв тяжелыми металлами отмечено уменьшение содержания в почвах водорастворимых фенольных соединений, что является следствием изменения биоактивности почв, замедления процесса разложения лигнина, основного источника фенольных соединений и других ароматических соединений. Негативное влияние загрязнения на процессы трансформации органического вещества, динамику водорастворимых его компонентов, уровень биоактивности почв, в целом на гумусное состояние земель [67].

В условиях города существенное влияние на различные характеристики и состояние почв оказывает загрязнение нефтепродуктами, различными видами топлива, маслами, битумами и т. п. [4]. Попадая в почву, они оказывают на ее гумусовое состояние существенное – как прямое, так и опосредованное – воздействие. Опосредованное воздействие заключается в значительном (вплоть до необратимого) изменении всех химических, физико-химических и физических свойств почвы. Это приводит к нарушению жизнедеятельности почвенной микробиоты и изменению всех процессов гумусообразования – гумификации, трансформации и минерализации почвенного органического вещества. Непосредственное влияние нефтезагрязнений проявляется в химическом взаимодействии углеводов нефти с собственно почвенными гумусовыми кислотами. Подобного рода взаимодействия вызывают изменения как фракционного состава гумусовых кислот почв, так и их химического строения и функциональных свойств. Во всех почвах, испытывающих техногенное загрязнение нефтепродуктами, отмечено достоверное уменьшение содержания собственно гумусовых кислот, которые, как известно, составляют основу почвенного плодородия. При этом резко возрастает доля негидролизующего остатка (т. е. не извлекаемой в процессе фракционирования гумуса различными химическими экстрагентами части органического вещества), который в почвах естественных ландшафтов представлен так называемым гумином и гуминоподобными веществами, трудногумифицируемыми растительными остатками типа лигнинов, терпенов, воскосмол и битумов. Загрязнение почв металлами существенно влияет на активность почвенных ферментов (табл.8).

Как уже отмечалось, пылевые выбросы промышленных предприятий характеризуются высокими концентрациями широкой группы химических элементов. Это в существенной мере и определяет важнейшую особенность городских почв – формирование в них комплексных по составу техногенных геохимических аномалий, когда уровни содержания химических элементов в почвах (особенно в их верхнем горизонте) многократно превышают не только природный фон, но и – довольно часто – гигиенические нормативы, отличаясь при этом очень неоднородным распределением в пределах городской территории.

Таблица 8

Влияние тяжелых металлов на активность почвенных энзимов [2]

Элемент (валентность)	Количество фермента, ингибированного в почве, %		
	Фосфатаза	Арилсульфатаза	Уреаза
Ag ⁺	39	96	93
Cd ²⁺	6	37	54
Hg ²⁺	10	94	88
Cr ³⁺	5	41	27
W ⁶⁺	7	25	0
Cu ²⁺	–	24	68
Mo ⁶⁺	59	54	12
Zn ²⁺	5	27	39
V ⁴⁺	–	88	23

Пространственно-морфологическое строение техногенных геохимических аномалий, фиксируемых городскими почвами, довольно сложное и в общем случае определяется характером и расположением источников загрязнения, метеорологическими условиями рассеивания поллютантов в атмосферном воздухе, геоморфологическим строением территории и спецификой ее застройки. Как правило, обширные по площади зоны загрязнения образуют химические элементы, масса которых преобладает в техногенных выбросах, хотя абсолютные концентрации их могут быть не очень высокими. Наиболее же интенсивные по степени концентрирования аномалии характерны для химических элементов, специфическими для того или иного производства, абсолютные концентрации которых в выбросах обычно очень велики. Максимальные содержания таких элементов, как правило, приурочены к почвам территории промышленных зон (табл. 9). По данным [66], размеры образующихся в почвах геохимических аномалий корреляционно связаны с интенсивностью промышленных выбросов, что особенно хорошо прослеживается при наблюдении в районе единичных источников (табл. 10). Очень высокие концентрации отмечаются в почвах в зонах влияния металлургических предприятий (табл. 11–13). Своеобразная геохимическая обстановка формируется в районах городских канализационных сооружений [110].

Таблица 9

Геохимические ассоциации в почвах промышленных зон г. Саранска [102]

Завод	Химические элементы и порядок значений их K_C^*				
	>100	100–30	30–10	10–3	3 – 1,5
Электроламповый	Hg	Sb-Ag-Pb	Mo-Cd-Tl-W-Zn	Cu-Ba-Ge-F-Sn	Cr-Co-V-Ni-Bi-As-Be-
Источников света и электровакуумного стекла	–	Pb	Hg	Mo-W-Cu-F-V-Zn-Sb	Cd-Ge-Cr-Li-Ag-Bi-As-Sn-B
Электровыпрямитель	–	Mo	Cd-W-Cu-Ag	Sn-Hg-Pb-Ge-Bi-F-Be-Zn	B-Co-V
Силовой электроники	–	–	Mo-	W-Pb-F-Be-Cu-Bi	Ge-Mn-Cr-Cd-Co-B-Zn-Ag-
Полупроводниковых изделий	–	–	–	Pb-F-Bi-Be	Cu-Ge-B-Co-Mo-Hg-Zn-V-Li
Точных приборов	–	–	–	Be-F-Pb-Bi	Ge-Cu-Hg-Mo-B-V-Co

* K_C – коэффициент концентрации относительно содержания в фоновых почвах.

Таблица 10

Зависимость площадей техногенных геохимических аномалий в почвах от характеристик промышленного выброса [66]

Элемент	Выбросы		Площадь аномалий, общая, км ²	Площадь аномалий в контуре K_C^2 (в км ²)				
	P, т/год	K_C^1		1,5	3	10	30	100
Pb	12,6	383	24,2	11,2	9,5	2,1	0,8	0,6
Zn	7,4	112	12,3	8,6	2,7	0,7	0,3	0
Cu	2,1	62	6,6	4,4	0,9	0	0,2	0
Ni	0,7	30	0,6	0,6	0	0	0	0
Cr	1,1	19	0,4	0,4	0	0	0	0

Примечание. P – количество металла, поступившее с пылевым выбросом в атмосферу; K_C^1 – коэффициент концентрации металла в промышленной пыли; K_C^2 – коэффициент концентрации металла в почвах.

Таблица 11

Металлы в огородных почвах в зоне влияния свинцово-цинкового рудника (Салаир, карьеры и ОФ), мг/кг воздушно сухой почвы [27]

Металл	Фон, Западная Сибирь	Пределы,	Число проб (%) с содержанием выше фона
Цинк	85,5	199–1919	100
Свинец	16,4	48,9–515,3	100
Кадмий	0,074	<0,375–8,25	100
Медь	33,8	33,1–241	95
Никель	25,9	26,9–60,3	95
Хром	59,5	47,9–186,2	95

Таблица 12

Металлы в огородных почвах в зоне влияния цинкоплавильного завода (Белово), мг/кг воздушно сухой почвы [27]

Металл	Фон, Западная Сибирь	Пределы,	Число проб (%) с содержанием выше фона
Цинк	85,5	102–14125	100
Свинец	16,4	16,6–648,7	100
Кадмий	0,074	1,2–56	100
Медь	33,8	34,7–219,8	100
Никель	25,9	30,2–58,9	100
Хром	59,5	35,5–128,8	92

Таблица 13

Металлы в огородных почвах в зоне влияния металлургических предприятий (Новокузнецк), мг/кг воздушно сухой почвы [27]

Металл	Фон, Западная Сибирь	Пределы	Число проб (%) с содержанием выше фона
Цинк	85,5	102–646	100
Свинец	16,4	15,5–95,5	98
Кадмий	0,074	0,04–3,05	95
Медь	33,8	24,5–74,2	95
Никель	25,9	17,4–83,2	98
Хром	59,5	16,9–166	66

В экстремальных ситуациях в городах формируются зоны техногенного загрязнения, отличающиеся чрезвычайно высокими концентрациями в почвах и других компонентах среды обитания либо комплекса химических элементов, либо (чаще всего) одного, как правило, очень токсичного химического элемента (табл. 14, рис. 3). Следует отметить, что во многих городах существуют разнообразные источники поступления ртути в окружающую среду [88, 93, 95, 96, 98, 100, 103], наиболее существенными из которых являются предприятия цветной металлургии [97]. Локальным, но достаточно интенсивным источником загрязнения городской среды ртутью являются ртутьсодержащие отходы [38, 66, 75, 76]. Типичными поллютантами городской среды, в том числе накапливающиеся в почвах, являются серебро [106] и металлы платиновой группы [101]. Особенно интенсивно платиноидами загрязняются придорожные территории. Свообраз-

ным источником загрязнения почв являются разливы городских рек и использование воды последних для орошения пойменных угодий [112].

Таблица 14

Структура загрязнения территории г. Темиртау (Казахстан) ртутью и ее запасы в верхнем (0-10 см) слое почв [87]

Уровень загрязнения	Площадь аномалий		Содержание, мг/кг		K_c	Запасы Hg, т
	км ²	% от территории	среднее	пределы		
Фоновый	1,1	2,6	0,015	0,01–0,02	1,5	0,002
Слабый	10,6	26,3	0,08	0,021–0,1	8	0,102
Средний	6,7	16,6	0,3	0,11–0,39	30	0,241
Сильный	18,8	46,4	0,9	0,40–2,09	90	2
Опасный	0,5	1,3	3	2,10–21	300	0,180
Очень опасный	1,7	4,2	10	4–21	1000	1,4
Чрезвычайно опасный	1,1	2,6	375	21–2000	37500	49
Общее	40,5	100	–	–	–	~ 53

Примечание: K_c – коэффициент концентрации относительно фонового содержания; в городе расположен завод, использующий при производстве ацетальдегида ртуть в качестве катализатора, общая эмиссия которой оценивается в 1200 т (примерно за 40-летний период).

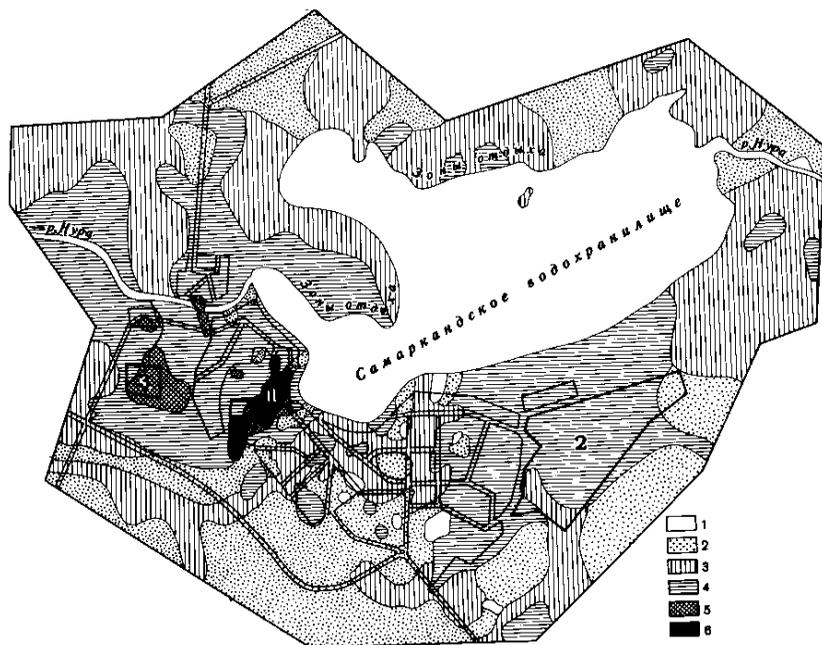


Рис. 3. Карта-схема загрязнения территории г. Темиртау ртутью (по уровням ее содержания в верхнем слое почв) [87]. Уровень загрязнения: 1 – фоновый; 2 – слабый; 3 – средний; 4 – сильный; 5 – опасный и очень опасный; 6 – чрезвычайно опасный; I – промзона завода «Карбид»; II – промзона Карагандинского металлургического комбината; III – территория городских очистных сооружений

Неоднородность пространственного распределения химических элементов в почвах, о которой говорилось выше, очень резко проявляется и в пределах конкретных промышленных зон, но, как правило, при общем высоком уровне валовых содержаний элементов (рис. 4, табл. 15). Такая неоднородность может быть обусловлена дискретностью поставки химических элементов с промышленными выбросами и твердыми отходами, наличием в пределах промышленных зон различных по своим характеристикам и мощности локальных источников загрязнения, неоднородностями ветрового поля, своеобразием химического и гранулометрического состава почв. Естественно, что имеют значение также продолжительность и объем эмиссии поллютантов.

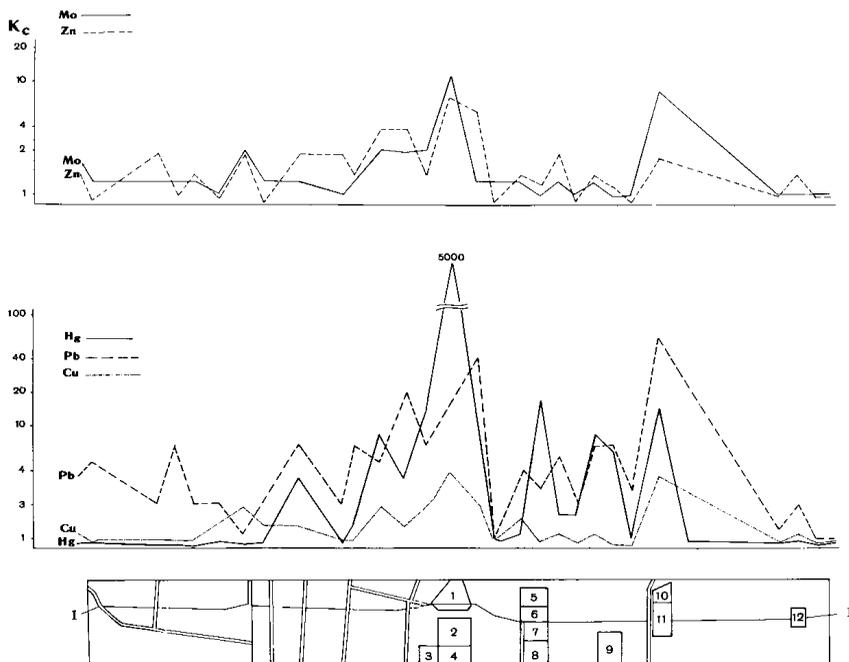


Рис. 4. Распределение металлов в верхнем слое почв г. Саранска [8].

K_c – коэффициент концентрации относительно фоновое содержания; цифрами на схеме показаны промзоны заводов: 1 – электролампового, 2 – Биохимик, 3 – Электровыпрямитель, 4 – приборостроительного, 5 – автопромоборудования, 6 – автосамосвалов, 7 – кабельного, 8 – инструментального, 9 – крупнопанельного домостроения, 10 – НИИ источников света, 11 – специальных источников света и электровакуумного стекла, 12 – телевизионного; I – I – линия профиля (юг-север)

При наличии мощных и длительно действующих источников техногенного загрязнения не только верхние горизонты почв, но и практически весь почвенный профиль (до глубины в 80–120 см и даже больше) характеризуется аномальными содержаниями многих химических элементов. Практически всегда различные функциональные зоны городов закономерно отличаются особенностями распределения, интенсивностью концентрирования и глубиной проникновения тяжелых металлов и других поллютантов в почвенном профиле (рис. 5, 6, табл. 16, 17).

**Металлы в почвах территорий электролампового завода
и завода специальных источников света и электровакуумного стекла,
г. Саранск, мг/кг [89]**

Металл	Электроламповый			Специальных источников света		
	Среднее	Пределы	Коэффициент осцилляции	Среднее	Пределы	Коэффициент осцилляции
Hg	28,3	0,08–300	1059	0,84	0,015–5	593
Sb	60	30–300	450	3	1,5–5	116
Ag	1,8	0,05–50	2775	0,08	0,05–0,3	312
Tl	4	3–5	50	–	–	–
Ba	2530	100–30000	1181	380	100–1500	368
Cd	6	3–50	783	1	0,3–3	270
Pb	213	10–1000	464	20	10–10000	49950
Zn	950	80–6000	623	280	50–1000	339
Sr	225	30–1000	431	75	30–300	360
Mo	8,7	0,5–100	1143	6,6	1–100	1500
W	9	5–30	277	11	5–70	590
Sn	11,7	1–60	504	5,4	3–30	500
Cu	198	30–300	136	186	30–1000	522
Cr	199	30–2000	990	136	30–2000	1448
Ni	63	20–300	444	49	20–150	265
V	202	70–600	262	345	80–600	150

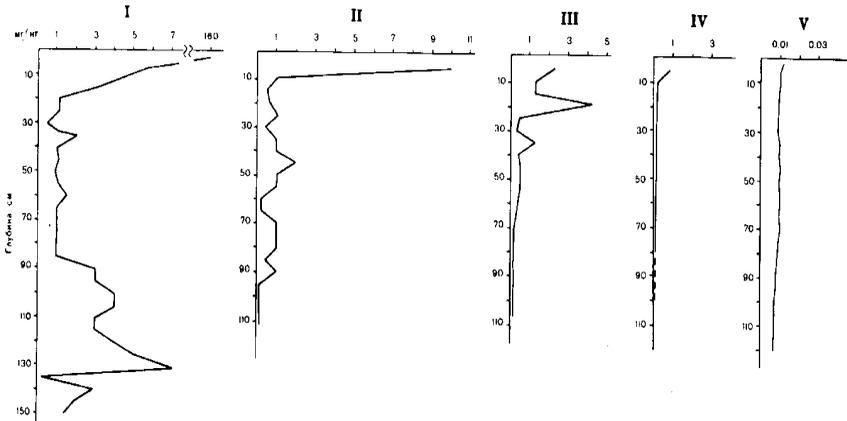


Рис. 5. Распределение ртути в профиле почв в пределах города Темиртау и его окрестностях [87]: I – промзона завода Карбид; II – вблизи промзоны; III – центр города; IV – восточный район города; V – фоновый участок

Не исключено, что по особенностям горизонтального и вертикального распределения химических элементов в почвах можно судить об их источниках и о способах накопления, в существенной мере определяющих подвижность поллютантов. В частности, металлы, поступающие из почвообразующих пород, обычно характеризуются относительно равномерным распределением концентраций по профилю почвы. Техногенные источники обуславливают накопление металлов главным образом в верхних горизонтах почв. Привнос металлов с золовой пылью можно, очевидно, распознать по отчетливому снижению их концентраций в верхнем слое по направлению преобладающих ветров. Внесение металлов в составе удобрений приводит к увеличению количества их подвижных соединений, что представляет прямую угрозу для почвенной фауны.

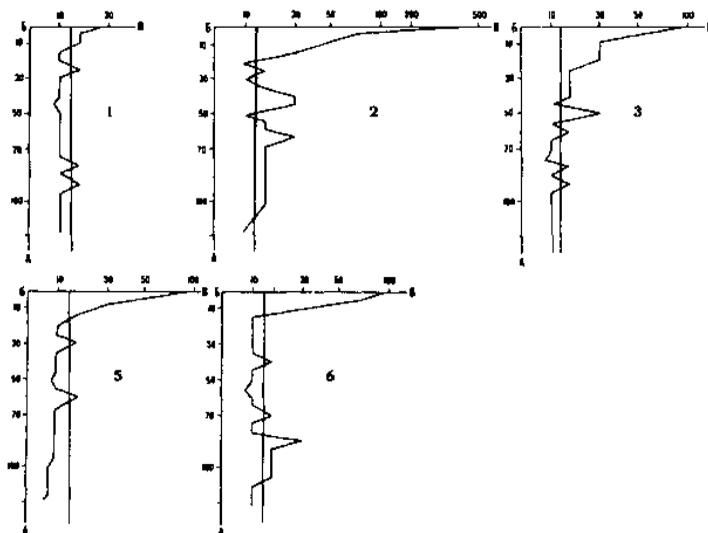


Рис. 6. Свинец в профиле почв города Саранска [8]: А–Б – глубина, см; Б–В – концентрация, мг/кг; вертикальная линия – уровень местного фона; расположение разрезов: 1 – жилой микрорайон Светотехника, 2 – промзона СИС-ЭВС, 3 – Северный (ТЭЦ-2 и зона влияния СИС-ЭВС), 5 и 6 – промзона СЭЛЗ

Таблица 16

Металлы в верхнем слое почв различных районов г. Ростока, мг/кг [129]

Район	Медь	Цинк	Кадмий	Свинец
Почвы садовых участков	35	283	0,56	194
Жилая застройка	10	34	0,26	36
Парки	3	13	0,27	15
Спортивные площадки	6	28	0,17	15
Кладбища	12	152	0,72	57

**Характеристика почв функциональных зон заречной части
города Н. Новгорода, мг/кг [77]**

Показатель	Промыш- ленная	Транс- портная	Селитбно- транспортная	Сели- тебная	Рекреа- ционная	Агротех- ногенная	Естественные ландшафты
Валовое содержание							
Свинец	47,4	41	41,5	31,1	18,9	33,9	5,7
Кадмий	0,82	1,86	0,68	0,52	0,55	0,61	0,32
Медь	32,3	32,6	25,2	11,4	7,8	25,6	3,9
Цинк	45,7	50,4	52,1	33,1	36,7	42,9	16,4
Хром	12,7	23,4	11,1	8,7	7,9	15,9	5
Кобальт	4,6	3,7	5,1	4,5	9,4	6,6	2
Z _c	23,2	25,9	20,1	11,5	9,5	14,9	1,2
Бенз(а)пирен	0,153	0,171	0,099	0,039	0,041	0,059	–
Нефтепродукты	115	239	250	127	–	307	–
pH	7,3	7,0	7,0	6,3	6,0	6,3	5,1
P ₂ O ₅	168	265	312	238	100	415	82
K ₂ O	154	104	167	132	78	189	66
Гумус, %	3,92	3,83	3,86	3,49	–	3,82	2,98
Подвижные формы, % от вала							
Свинец	29,1	26,5	33,4	33,7	53,5	47,0	39,1
Кадмий	18,8	11,1	21,9	24,7	15,6	20,6	23,5
Медь	3,9	4,7	3,4	2,9	5,2	2,6	5,9
Цинк	21,8	22,9	21,4	20,6	24,2	21,1	10,2
Хром	4,5	11,8	5,1	4,7	6,1	4,5	6,9
Кобальт	23,1	23,9	25,3	27,1	18,7	21,9	25,5

Интенсивным загрязнением характеризуется почвенный покров г. Санкт-Петербурга [11, 32, 128]. Обобщенная техногенная геохимическая ассоциация в целом для почв города выглядит следующим образом (цифры – коэффициенты концентраций): Hg₁₃ – Zn₉ – (Sb, Sn)₈ – Pb₇ (W, Cd)₆ – (Cr, Cu)₅. В целом по городу содержание элементов достаточно стабильно в течение последних лет и представлено в следующем порядке (табл. 18).

Считается, что наиболее актуальной для Санкт-Петербурга является проблема свинцового, кадмиевого и цинкового загрязнения, распространенного повсеместно, но особенно в местах размещения промышленных зон и транспортных магистралей. Для города в целом средняя величина показателя суммарного загрязнения Z_c составляет 54, причем величина его существенно варьирует по городским районам. Максимальные величины Z_c характерны для жилых зон центра города и восточных его окраин. Результаты многолетних исследований содержания органических соединений в почвах города приведены в табл. , на основании которой можно констатировать высокий уровень загрязнения города бенз(а)пиреном, слабый – нефтепродуктами и незначительность загрязнения полихлорированными бифенилами и хлорорганическими пестицидами (табл. 19).

**Химические элементы в почвах Санкт-Петербурга
(мг/кг абсолютно сухого веса) [128]**

Элементы	Минимум	Максимум	Среднее содержание
элементы 1 класса опасности			
Hg	0,001	230,00	0,38
Pb	2,00	29448,00	125,40
As	0,10	600,00	4,60
Cd	0,01	397,60	0,94
Zn	15,00	45000,00	393,19
Se	0,50	861,00	1,29
элементы 2 класса опасности			
Ni	0,75	7000,00	37,04
Co	0,75	1000,00	9,68
Cr	0,80	30000,00	66,20
Mo	0,35	500,00	2,57
Cu	3,00	15000,00	92,58
Sb	0,01	500,00	1,21
элементы 3 класса опасности			
Mn	10,00	70000,00	337,56
V	0,80	10000,00	31,23
Sr	20,00	10000,00	137,08
Ba	10,00	50000,00	438,89
W	0,80	1500,00	6,34
прочие элементы			
Sn	0,50	2000,00	11,09
Ge	0,08	150,00	0,88
Ga	1,00	330,00	17,92
Be	0,20	30,00	1,14
Y	1,00	150,00	19,93
P	10,00	45000,00	758,02
Li	0,80	500,00	28,68
Bi	0,01	99,30	0,45
Tl	0,04	21,70	0,66

**Средние содержания приоритетных органических поллютантов
в почвогрунтах Санкт-Петербурга, мкг/кг [128]**

Органические поллютанты	ПДК	Типы землепользования					
		рекреации	агрооудья	жилые зоны	пустыри	промзоны	свалки
Бенз(а)пирен	20,0	36,6	102,1	67,1	136	148,4	241,1
ПХБ	60,0	5,0	16,1	74,4	33,7	24,2	73,2
Сумма ДДТ	100,0	7,5	140,8	87,4	205	41	48,7
Нефтепродукты, мг/кг	180	734	165	797	330	719	829

Геохимическое картирование территорий более чем 30 городов позволило выявить типовые структуры загрязнения для их 3-х основных групп: многоотраслевых типа «центр», специализированных и условно фоновых [66]. В основу такого выделения было положено соотношение площадей территории с различным уровнем загрязнения и разной степенью опасности для человека. Уровень загрязнения оценивался по четырем категориям: относительно чистая, умеренно опасная, опасная и чрезвычайно опасная (рис. 7).

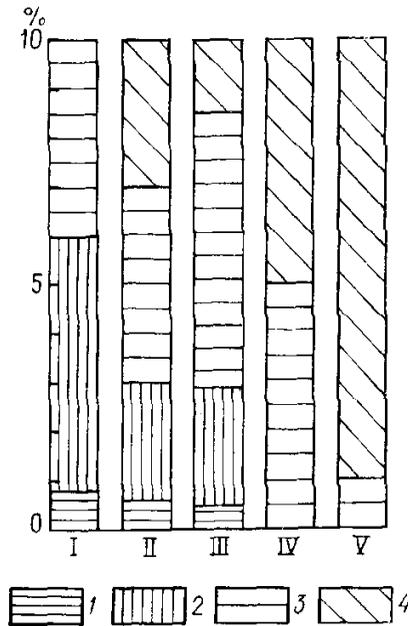


Рис. 7. Типичные структуры загрязнения территорий городов [66]:
 1–4 – уровни загрязнения: 1 – чрезвычайно опасный (Z_c – более 128),
 2 – опасный (Z_c – 32–128), 3 – умеренно опасный (Z_c – 16–32),
 4 – неопасный (Z_c – менее 16). Типы городов: I – специализированный металлургический,
 II – многоотраслевой типа «центр», III – автотранспортный,
 IV – малый непромышленный. Z_c – суммарный показатель загрязнения.

Самая неблагоприятная экологическая обстановка характерна для городов с преобладанием металлургических предприятий. Для некоторых из них почти вся территория может соответствовать опасной зоне загрязнения химическими элементами. Уровень загрязнения в городах с плохими для рассеивания пылевых выбросов ландшафтными условиями, даже при небольшой промышленной нагрузке, но с интенсивным движением автотранспорта, соизмерим с уровнем загрязнения крупных городов с многоотраслевой промышленностью. В средних и малых городах с машиностроительными предприятиями структура загрязнения складывается вполне удовлетворительно. Опасных и чрезвычайно опасных по уровню загрязнения территорий здесь встречается немного, иногда их практически нет. Сравнительно нормальные условия для жизнедеятельности человека наблюдаются в небольших городах с ограниченным развитием местной промышленности, в микрорайонах крупных городов, удаленных от предприятий на 5–10 км, в городах-спальнях. Умеренно опасный уровень загрязнения здесь обнаруживается не более чем на 10–20% территории. Как правило, для крупных городов предпочтительна порфиридная структура размещения промышленности, при которой отдельные предприятия комплектуются в своеобразные блоки, формирующие так называемые промышленные зоны. От других функциональных зон (селитебной, рекреационной и др.) они должны быть отделены буферной оной, учитывающей масштабы воздействия предприятий. Для малых и специализированных городов эффективен только зональный тип функциональной структуры.

3. Эколого-гигиеническая роль почвенного покрова

С эколого-гигиенической точки зрения опасность загрязнения городских почв определяется [28, 47, 66, 73, 85, 117, 140]: 1) эпидемиологической значимостью загрязненной химическими веществами почвы; 2) ее ролью как вторичного источника загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, природных вод, жилой и производственной среды; 3) возможностью непосредственного и опосредованного воздействия содержащихся в почве поллютантов на живые организмы; 4) значимостью почвы для развития зеленых насаждений, играющих значительную роль в формировании качества городской среды; 5) изменением буферной способности и снижением биоактивности почвы в условиях интенсивного загрязнения; 6) важностью почвы как универсального абсорбента и биологического нейтрализатора, осуществляющего минерализацию многих органических веществ.

Техногенное загрязнение почв приводит к изменению количественного и группового состава обитающих в них микроорганизмов [35, 47]. Исследования показывают, что многие микроорганизмы заметно реагируют даже на небольшое повышение содержания в ней тяжелых металлов. При этом акциномицеты, бактерии и микробактерии менее устойчивы, чем грибы и дрожжи. В то же время есть сведения, говорящие о высокой устойчивости микроорганизмов к этому фактору. Дело в том, что чрезвычайная быстрота их размножения и смены поколений способствует эффективному отбору наиболее приспособленных форм микробов. Обычно в загрязненной почве на фоне уменьшения истинных представителей почвенных микробоценозов (антагонистов патогенной кишечной микрофлоры) и снижения ее биоактивности отмечается увеличение положительных находок патогенных энтеробактерий и геогельминтов, которые более устойчивы к химическому загрязнению, нежели представители естественных почвенных микробоценозов. Во многих случаях городские почвы не отвечают существующим требованиям санитарных норм по микробиологическим показателям (табл. 20).

Данные о загрязнении почвы населенных мест Красноярского края [14]

Показатели санитарного состояния почвы	1994	1995	1996	1997	1998
Доля проб почвы, не отвечающих санитарным нормам по микробиологическим показателям	71,5	74,6	20,0	49,2	63,5

Учет и оценка неблагоприятных последствий загрязнения почв важны в связи с известными случаями геофагии у детей при их играх на загрязненных свинцом игровых площадках. При содержании этого металла в почве на уровне 500 мг/кг фиксировалось повышение его концентраций в крови, что, в свою очередь, сопровождалось изменением психоневрологического статуса у детей. По другим сведениям [47], указанным изменения можно ожидать при содержании свинца в почве игровых площадок в пределах 300 мг/кг. Высокая концентрация этого металла в окружающей среде г. Бангкока является причиной снижения у детей, при достижении ими семилетнего возраста, индекса интеллектуального развития на 4 и более пунктов [78]. Среднему повышению уровня свинца в почве на 1000 мг/кг соответствует среднее увеличение его содержания в крови детей на 5 мкг/100 мл, причем в некоторых случаях прибавка может возрастать в 3-5 раз [118]. Поступление частиц почвы в организм детей сейчас рассматривается в качестве одного из значимых механизмов воздействия окружающей среды на их здоровье [117, 125, 140]. Установлено, что в организм детей в возрасте от 1 года до 4 лет в процессе их обычной деятельности (игры, прогулки и т. п.) в среднем попадает 24-26 мг почвы в день [114]. При установлении допустимого уровня содержания вредных веществ в почве детских садов и игровых площадок принимается, что со своих загрязненных земель рук маленький ребенок может проглатывать порядка 1 г почвы в день [125].

Многие поллютанты, в том числе тяжелые металлы, способны улетучиваться из почвы в воздух в виде газообразных соединений; загрязненные почвы оказывают влияние на формирование состава городской пыли, присутствующей в воздухе и поступающей в помещения [91, 92, 94, 99, 136, 139]. Химический состав почв сказывается на качестве сельскохозяйственной продукции и состоянии городских насаждений, а поверхностный сток и фильтрация атмосферных осадков приводят к поступлению поллютантов в поверхностные водные объекты и грунтовые воды.

Хорошо известны также градостроительные, социальные и экономические негативные последствия и явления, обусловленные техногенным загрязнением городских территорий [51, 78], интенсивность которого напрямую сказывается на ценах на жилье и землю, сдерживает инвестиции в социальную сферу и в существенной мере предопределяет наличие в городах заметных пространственных различий в уровнях общественных благ, значительно усложняет планировочное развитие города и функционирование городского хозяйства в целом, обуславливает появление так называемых городских трущоб. Значительная доля заболеваний и преждевременных смертей в городской местности вызвано хроническим воздействием внешних факторов, ослабляющих защитные силы организма людей, среди которых загрязнению среды обитания принадлежит одна из ведущих ролей. Особенно актуальны эти проблемы для развивающихся стран и стран с переходной экономикой, где значительная доля населения остается незащищенной от много-

численных экологических угроз. Американский экономист М. Тодаро [78] справедливо утверждает, что если в этих странах не будут осуществляться специальные экологические программы, ориентированные на основную массу населения, то положение в них еще более будет ухудшаться по мере усиления процесса урбанизации.

Заключение

Интенсивность многолетнего техногенного воздействия и пространственная картина распространения загрязняющих веществ в городах особенно четко устанавливаются по химическому составу и геохимическим свойствам почв, являющихся относительно консервативным компонентом городских ландшафтов. В почвах формируются техногенные геохимические аномалии, пространственно отражающие зоны техногенного загрязнения, где концентрации поллютантов достигают опасных для живых организмов уровней. В этой проблеме особое место принадлежит загрязнению территорий городов тяжелыми металлами, поскольку быстрое и требуемое по соображениям гигиенической и экологической безопасности естественное самоочищение почв от металлического загрязнения затруднено, а во многих случаях практически невозможно. Это определяет необходимость разработки и внедрения в практику технологий ремедиации загрязненных городских почв. Следует отметить, что, как показывает мировой опыт, технически, несмотря на все еще неудовлетворительное состояние соответствующих исследований, уже найдены способы ограничения вредного воздействия промышленности и других видов хозяйственной деятельности на окружающую среду, а также разработаны технологии, позволяющие восстановить загрязненные территории [105, 109]. Более того, даже в финансовом отношении многие проблемы окружающей среды обходятся относительно недорого для современной экономически развитой страны. Именно поэтому во многих странах, с одной стороны, все яснее осознается тот факт, что охрана и восстановление природы уже представляет собой в гораздо большей степени политическую и организационно-правовую проблему, нежели проблему техническую или финансовую.

Сейчас в России лишь «Градостроительный кодекс Российской Федерации» (статья 10, § 4) законодательно определяет (хотя и в несколько неопределенной формулировке), что «территории, загрязненные химическими и биологическими веществами, вредными микроорганизмами свыше предельно допустимых концентраций, радиоактивными веществами в количествах свыше предельно допустимых уровней, в случаях, если проживание населения и осуществление хозяйственной и иной деятельности на таких территориях создают угрозу здоровью человека, подлежат консервации и специальной обработке в порядке, установленном законодательством Российской Федерации об охране окружающей природной среды». Однако в Федеральном законе «Об охране окружающей среды» указанный порядок не определен, ничего не говорится и о необходимости (обязательности) инвентаризации и восстановления (очистки) химических загрязненных территорий, в том числе, в пределах населенных и промышленных зон. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» также не устанавливает обязательность проведения инвентаризации и деконтаминации загрязненных городских почв. В Законе лишь декларируется положение о том, что «в почвах городских и сельских поселений... содержание потенциально опасных для человека химических... веществ... не должно превышать предельно

допустимые концентрации (уровни), установленные санитарными правилами» (ст. 21, § 21).

Сказанное, в сущности, и обуславливает актуальность разработки правовых основ деконтаминации (ремедиации) городских почв в нашей стране, определение организационного порядка проведения процедуры их инвентаризации и оценки, разработку и внедрение в практику соответствующих методов и технологий очистки загрязненных почв. Как справедливо подчеркивает В.В. Ермаков [24], технологии очистки загрязнений – промежуточная (и, надо добавить, необходимая) стадия на пути преобразования техносферы в ноосферу. Они будут (и должны) использоваться до тех пор, пока человечеством не будут созданы экологически чистые замкнутые технологии.

Литература

1. *Акентьева Л.И., Беляева В.А.* Влияние промышленных выбросов металлургического комплекса на растения и некоторые свойства почвы // Почвоведение, 1992, № 9, с. 164–169.

2. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.

3. Антропогенные изменения земельных ресурсов зарубежных стран. – М.: ВИНТИ, 1981. – 180 с.

4. *Бакина Л.Г., Орлова Е.Е., Орлова Н.Е.* Изменение гумусового состояния городских почв под влиянием нефтезагрязнения // Доклады Международного экологического конгресса «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности». Санкт-Петербург, 14–16 июня, 2000. Т. 2. – СПб.: Изд-во БГТУ, 2000, с. 185–187.

5. *Башаркевич И.Л., Морозова И.А., Самаев С.Б.* Влияние химического состава городских почв на состояние древесных насаждений // Экология большого города, 1998, № 3, с. 62–73.

6. *Безуглова О.С., Величко В.Ю., Приваленко В.В.* Влияние урбанизации на свойства почвенного покрова г. Азова // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды, 1999, № 3, с. 85.

7. *Бримблжумб П.* Состав и химия атмосферы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.

8. *Буренков Э.К., Янин Е.П., Кижаккин С.А. и др.* Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды г. Саранска. – М.: ИМГРЭ, 1993. – 115 с.

9. *Вишенкова Е.М., Ванеева Л.В., Гапонюк Э.И. и др.* Влияние бенз(а)пирена на биологическую активность почвы // Загрязнение атмосферы, почвы и растительного покрова. Вып. 10 (86). – М.: Гидрометеиздат, 1980, с. 66–71.

10. Влияние атмосферного загрязнения на свойства почв. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 205 с.

11. *Вортоломей А.А.* Химическое загрязнение почв Санкт-Петербурга // Международная конференция молодых ученых «Проблемы энергоресурсосбережения и экологии», Санкт-Петербург, 21–23 окт., 2002: Сборник трудов. – Санкт-Петербург: Изд-во ОЭЭП РАН, 2002, с. 130–139.

12. *Галиулин Р.В., Башкин В.Н., Галиулина Р.Р., Лебедев А.Т.* Оценка загрязнения почв бенз(а)пиреном и их биологической активности // Агрохимия, 1993, № 12, с. 62–65.

13. *Геннадиев А.Н., Солнцева Н.П., Герасимова М.И.* О принципах группировки и номенклатуры техногенно-измененных почв // Почвоведение, 1992, № 2, с. 49–60.

14. Гигиена почвы // http://res.krasu.ru/ses/doc/1_3.shtml.
15. Глазовская М.А. Техногенез как фактор почвообразования // Тез. докл. VI делегатского съезда Всесоюз. о-ва почвоведов. Т. 4. – Тбилиси, 1981, с. 3–4.
16. Глазовская М.А. Теория 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, с. 7–41.
17. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
18. Глазовская М.А., Солнцева Н.П., Геннадиев А.Н. Технопедогенез: формы проявлений // Успехи почвоведения. – М.: Наука, 1986, с. 106–112.
19. Горбов С.Н., Евсеева Н.В., Тищенко С.А., Юркова Е.П. Влияние урбанизации на каталазную активность чернозема обыкновенного рекреационной зоны г. Ростова-на-Дону // Мат-лы Междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов». 1988. Вып. 3. – М.: Изд-во МГУ, 1999, с. 275–276.
20. Грабовский Р.И. Атмосферные ядра конденсации. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 164 с.
21. Груздев М.В. Городские почвы, их особенность и опыт картографирования (на примере Ярославля) // Изв. АН СССР, сер. геогр., 1990, № 3, с. 103–111.
22. Евдокимова Г.А. Микробиологическая активность почв при загрязнении тяжелыми металлами // Почвоведение, 1982, № 6, с. 125–132.
23. Етеревская Л.В., Донченко М.Т., Лехучер Л.В. Систематика и классификация техногенных почв // Растения и промышленная среда. – Свердловск: Изд-во Свердловского ун-та, 1984, с. 14–21.
24. Ермаков В.В. Биогеохимическая эволюция таксонов биосферы в условиях техногенеза // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. – М.: Наука, 2003, с. 5–22.
25. Загрязнение воздуха и жизнь растений: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 535 с.
26. Зимон А.Д. Аэрозоли, или Джин, вырвавшийся из бутылки. – М.: Химия, 1993. – 208 с.
27. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растения. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
28. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 439 с.
29. Каздым А.А. Аутигенные биоминералы культурных слоев и почвогрунтов // Минералогия и жизнь: биоминеральные гомологии: Докл. 3 Междунар. семинара. Сыктывкар, 5–8 июня, 2000. – Сыктывкар: Геопринт, 2000, с. 93–94.
30. Каздым А.А. Техногенные минералы культурных слоев города // Минералогия техногенеза – 2001. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2001, с. 40–61.
31. Каздым А.А. Культурный слой как один из видов техногенного литогенеза и его литогеохимические особенности // Минералогия техногенеза – 2002. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2002, с. 226–247.
32. Капелькина Л.П., Бакина Л.Г., Бардина Т.В. Экологическое состояние почв озелененных транспортных магистралей Санкт-Петербурга // Экология большого города: Альманах. Вып. 5. Проблемы содержания зеленых насаждений в условиях Москвы. – М.: Группа «СТАГИТИТ», 2001, с. 91–96.

33. *Келеберда Т.Н., Другов А.Н.* О систематике и классификации почв, образованных в процессе техногенеза // Почвоведение, 1983, № 11, с. 17–21.

34. *Ковда В.А.* Патология почв и охрана биосферы планеты. – Пузино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1989. – 36 с.

35. *Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф.* Влияние загрязнения тяжелыми металлами на микробную систему чернозема // Почвоведение, 1999, № 4, с. 505–511.

36. *Королев В.А.* Очистка грунтов от загрязнений. – М.: Наука, 2001. – 365 с.

37. *Кулуцков В.Н., Сирин А.А.* Прикладные аспекты изучения загрязнения снежного покрова выбросами черной металлургии // География и рациональное природопользование. – М., 1979, с. 38–40.

38. *Латышенко А.В., Тимошин И.В., Тиняков К.М., Янин Е.П.* Опыт организации сбора и обезвреживания ртутьсодержащих отходов в Республике Крым и городе Севастополе // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2017, № 3, с. 141–145.

39. *Лебедева И.И., Тонконогов В.Д., Шишов Л.Л.* Классификационное положение и систематика антропогенно-преобразованных почв // Почвоведение, 1993, № 3, с. 106.

40. *Лепнева О.М., Обухов А.И.* Экологические последствия влияния урбанизации на состояние почв Москвы // Экология и охрана природы Москвы и Московской области. – М., 1990, с. 63–69.

41. *Лозе Ж., Матье К.* Толковый словарь по почвоведению: Пер. с франц. – М.: Мир, 1998. – 398 с.

42. *Луценко С.В., Лебедев В.И., Лыкосов В.Н.* Моделирование процессов переноса почвенного аэрозоля в конвективном пограничном слое атмосферы // Междунауч. конф. «Физика атмосферного аэрозоля» к 85-летию со дня рождения Г.В. Розенберга. Москва, 12–17 апреля, 1999: Труды конф. – М.: Диалог-МГУ, 1999, с. 216–229.

43. *Марфенина О.Е.* Изменение структуры комплекса микроскопических грибов при загрязнении почв тяжелыми металлами // Вестник МГУ. Почвоведение, 1985, № 2, с. 46–50.

44. *Матвеева Л.И., Генералова В.А.* Влияние техногенной нагрузки на агрессивность грунтов // Инженерная геология, 1992, № 1, с. 13–22.

45. *Маханько Э.П., Малахов С.Г., Вертинская Г.К.* Опыт исследования загрязнения почв металлами вокруг металлургических предприятий // Тр. ИЭМ, 1985, вып. 13 (128), с. 50–59.

46. *Медведева М.В., Яковлев А.С.* Влияние технонагрузки на состояние почвенной биоты // Всерос. сов. и выездная науч. сессия «Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия», Апатиты, 22–25 июня, 1998: Тез. докл. – Апатиты, 1998, с. 192–193.

47. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. – М.: Минздрав СССР, 1987. – 25 с.

48. *Морозова И.А., Самаев С.Б., Якубов Х.Г.* Некоторые особенности засоления почв Москвы как техногенного процесса // Прикладная геохимия. Вып. 2. Экологическая геохимия. – М.: ИМГРЭ, 2001, с. 415–426.

49. *Мырлян Н.Ф., Настас Г.И., Милкова Л.Н.* Геохимическая трансформация распределения и форм нахождения тяжелых металлов в городских почвах // Вест. МГУ. Сер. 5, 1992, № 6, с. 84–91.

50. *Никифорова Е.М., Козин И.С., Цирд К.* Особенности загрязнения городских почв полициклическими ароматическими углеводородами в связи с влиянием печного отопления // Почвоведение, 1993, № 1, с. 91–100.

51. *О`Салливан А.* Экономика города: Пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 706 с.

52. *Первунина Р.И., Малахов С.Г.* Подвижность металлов, выпавших на почву в составе выбросов промышленных предприятий // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах (Тр. V Всес. сов., Обнинск, 1987). – Л.: Гидрометеиздат, 1988, с. 171–179.

53. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. – М.: Астрейя-2000, 1999. – 768 с.

54. *Перцович А.Ю., Суханов П.А.* Систематика и диагностика основных типов антропоземов и техногенных поверхностных образований // Тез. докл. Междунар. конф. «Проблемы антропогенного почвообразования», Москва, 16–21 июня, 1997. Т. 2. – М., 1997, с. 104–107.

55. *Петрянов-Соколов И.В., Сутургин А.Г.* Аэрозоли. – М.: Наука, 1989. – 144 с.

56. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 272 с.

57. *Прокофьева Т.В.* Особенности функционирования городских почв под асфальтобетонными покрытиями // Тез. докл. Междунар. конф. «Проблемы антропогенного почвообразования», Москва, 16–21 июня, 1997. Т. 2. – М., 1997, с. 223–227.

58. *Прокофьева Т.В.* Почвенный покров Москвы // <http://moskvoved.narod.ru/pochva.htm>.

59. *Рохмистров В.Л.* Роль техногенеза в формировании почв урбанизированных территорий // Географические аспекты рационального природопользования в Верхневолжском Нечерноземье. – Ярославль: Изд-во Ярославского пединститута, 1984, с. 10–26.

60. *Русаков Н.В., Тонкопий Н.И., Великанов Н.Л.* Почвы мегаполисов: загрязнение и контроль // Вестник экол. образования в России, 1999, № 3, с. 12–13.

61. *Сает Ю.Е.* Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): Автореф. дис.... д-ра геол.-мин. наук. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 53 с.

62. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А.* Геохимические аспекты экологии человека в городе // Проблемы экологии человека. – М.: Наука, 1986, с. 33–42.

63. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А.* Эколого-геохимические подходы к разработке критериев нормативной оценки состояния городской среды // Изв. АН СССР, сер. географ., 1988, № 4, с. 37–46.

64. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Смирнова Р.С. и др.* Город как техногенный субрегион биосферы // Биогеохимическое районирование и геохимическая экология. – М.: Наука, 1985, с. 133–166.

65. *Сает Ю.Е., Смирнова Р.С.* Геохимические принципы выявления зон воздействия промышленных выбросов в городских агломерациях // Вопросы географии, 1983, № 120, с. 45–55.

66. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

67. *Сатегина И.А.* Влияние загрязнения на гумус и плодородие почв промышленных ландшафтов // Ландшафтный анализ природопользования. – М.: МФ ГО СССР, 1987, с. 79–84.

68. *Сорокина Е.П.* Геохимическая структура техногенных ореолов промышленных зон различного типа // Новые области применения геохимических методов. – М.: ИМГРЭ, 1981, с. 8–13.

69. *Сорокина Е.П.* Картографирование техногенных аномалий в целях геохимической оценки урбанизированных территорий // Вопросы географии, 1983, № 120, с. 55–67.

70. *Сорокина Е.П., Азальцова Е.Б., Григорьева О.Г., Сает Ю.Е.* Выявление геохимических ассоциаций элементов как метод исследования техногенных аномалий // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Тр. 2-го Всес. сов., Обнинск, 1978. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, с. 91–99.

71. *Сорокина Е.П., Кулачкова О.Г., Онищенко Т.Л.* Сравнительный геохимический анализ воздействия на окружающую среду промышленных предприятий различного типа // Методы изучения техногенных геохимических аномалий. – М.: ИМГРЭ, 1984, с. 9–20.

72. *Сорокина Е.П., Янишевская Н.Б., Борисенко И.Л.* Техногенные аномалии в почвах городов как индикатор загрязнения атмосферы промышленными выбросами // Исследование окружающей среды геохимическими методами. – М.: ИМГРЭ, 1982, с. 25–37.

73. Состояние зеленых насаждений в Москве. Аналитический доклад. По данным мониторинга 1997 г. – М.: «Прима-Пресс. 1998. – 238 с.

74. *Строганова М.Н.* Почва, город и экология // Тез. докл. 2 Съезда Общества почвоведов, С.-Петербург, 27–30 июня, 1996, Кн. 1. – М., 1996, с. 46–47.

75. *Тимошин В.Н., Янин Е.П., Тимошин И.В.* Оценка отходов электронного оборудования как источника поступления ртути в окружающую среду // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2016, № 3, с. 2–7.

76. *Тимошин И.В., Янин Е.П., Тиняков К.М., Латышенко А.В.* Сбор и обезвреживание ртутьсодержащих отходов в Крыму // Твердые бытовые отходы, 2016, № 8, с. 46–49.

77. *Титова В.И., Дабахов М.В., Шафранов О.Д.* Геохимические особенности формирования почв индустриального города // Экология почвы. Избранные лекции 10-й Всероссийской школы. Т. IV. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001, с. 274–278.

78. *Тодаро М.П.* Экономическое развитие: Пер. с англ. – М.: Экономический факультет МГУ, ЮНИТИ, 1997. – 671 с.

79. *Томсон Д.* Использование городских земель в США: новые источники данных // Международная география. Вып. 7. География населения: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1976, с. 94.

80. *Тонконогов В.Д., Шишов Л.Л.* О классификации антропогенно-преобразованных почв // Почвоведение, 1990, № 1, с. 72–79.

81. *Трубецкой О.А., Золотарева Б.Н., Стрнад В. и др.* Влияние тяжелых металлов на величину электрокинетического потенциала илстой фракции серой лесной почвы // Агрохимия, 1992, № 1, с. 80–83.

82. *Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А.* Почвы и почвенный покров промышленного города // Тез. докл. 2 Съезда Общества почвоведов, С.-Петербург, 27–30 июня 1966. – М., 1996, с. 143–144.

83. *Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Каздым А.А.* Техногенное засоление почв Москвы // Минералогия техногенеза – 2002: Сборник докладов 3 семинара, Миасс, 23–25 мая, 2002. – Миасс: Изд-во Имин УрО РАН, 2002, с. 191–200.

84. *Шлегель Г.* Общая микробиология: Пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 567 с.

85. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 336 с.
86. Экология города. – М.: Научный мир, 2004. – 624 с.
87. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
88. Янин Е.П. Экологические аспекты производства и использования ртутных ламп. – М.: Диалог-МГУ, 1997. – 41 с.
89. Янин Е.П. Электротехническая промышленность и окружающая среда (эколого-геохимические аспекты). – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 281 с.
90. Янин Е.П. Введение в экологическую геохимию. – М.: ИМГРЭ, 1999. – 68 с.
91. Янин Е.П. Химические элементы в пылевых выбросах электротехнических предприятий // Медицина труда и пром. экология, 2000, № 8, с. 24–27.
92. Янин Е.П. Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды города Саранска. Состав техногенного загрязнения // Экологический вестник Мордовии, 2002, № 1, с. 25–33.
93. Янин Е.П. Ртуть в пылевых выбросах промышленных предприятий // Экологическая экспертиза, 2002, № 4, с. 10–29.
94. Янин Е.П. Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). – М.: ИМГРЭ, 2003. – 82 с.
95. Янин Е.П. Оценка эмиссии ртути в атмосферу российскими предприятиями черной металлургии // Экологическая экспертиза, 2004, № 5, с. 101–108.
96. Янин Е.П. Эмиссия ртути в атмосферу российскими предприятиями черной металлургии. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 16 с.
97. Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду предприятиями цветной металлургии России // Экологическая экспертиза, 2004, № 5, с. 41–101.
98. Янин Е.П. Оценка эмиссии ртути в окружающую среду при производстве кокса в России // Экологическая экспертиза, 2005, № 1, с. 2–9.
99. Янин Е.П. Кадмий в пылевых выбросах промышленных предприятий и его роль в загрязнении производственной и окружающей среды // Медицина труда и промышленная экология, 2006, № 9, с. 1–5.
100. Янин Е.П. Эмиссия ртути в атмосферу при сжигании каменного угля в России // Ресурсосберегающие технологии, 2006, № 3, с. 3–14.
101. Янин Е.П. Платиновые металлы в окружающей среде (распространенность, источники, техногенное загрязнение, рециклинг) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2008, № 5, с. 2–94.
102. Янин Е.П. Особенности распределения химических элементов в почвах промышленных зон // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2009, № 9, с. 62–69.
103. Янин Е.П. Пылевые выбросы предприятий как источник поступления ртути в городскую среду // Экология урбанизированных территорий, 2009, № 4, с. 69–72.
104. Янин Е.П. Химические элементы в пылевых выбросах электротехнических предприятий и их роль в загрязнении окружающей среды // Экологические системы и приборы, 2009, № 2, с. 53–58.
105. Янин Е.П. Особенности и экономические аспекты организации работ по ремедиации загрязненных территорий в зарубежных странах // Экономика природопользования, 2012, № 3, с. 140–148.

106. Янин Е.П. Промышленная пыль как источник поступления серебра в городскую среду // Экологическая экспертиза, 2014, № 1, с. 9–15.

107. Янин Е.П. Роль промышленной пыли в формировании общего состава и физико-химических свойств городских почв // Экологическая экспертиза, 2015, № 3, с. 53–76.

108. Янин Е.П. Геохимические последствия хозяйственной деятельности человека // Экологическая экспертиза, 2017, № 3, с. 2–43.

109. Янин Е.П. Иммобилизация химических элементов и детоксикация загрязненных почв (основные подходы и методы) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2017, № 3, с. 2–27.

110. Янин Е.П. Оценка потенциального влияния на наземные ландшафты городских канализационных очистных сооружений // Экологическая экспертиза, 2017, № 2, с. 7–18.

111. Янин Е.П. Техногенез и окружающая среда: эколого-геохимические аспекты // Геоэкологические исследования состояния окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 2017, с. 8–45.

112. Янин Е.П. Эколого-геохимические преобразования пойменных ландшафтов при разливах рек и использовании речных вод для орошения в зонах техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2018, № 6, с. 31–50.

113. Abumaizar R.J., Smith E. Heavy metal contaminations removal by soil washing // J. Hazardous Mater., 1999, 70, № 1–2, p. 71–86.

114. Barnes R.M. Childhood soil ingestion: How much dirt do kids eat? // Anal. Chem., 1990, 62, № 19, p. 1023A–1033A.

115. Beavington F. Contamination of soil with zinc, copper, lead, and cadmium, in the Wollong city area // Australian J. Soil Res., 1973, 11, p. 23–31.

116. Beavington F. Heavy-metal contamination of vegetables and soil in domestic gardens around a smelting complex // Environ. Pollut., 1975, 9, p. 211–217.

117. Bowen H.J.M. Environmental Chemistry of the Elements. – London Ltd.: Academic Press., 1979. – 333 p.

118. Buchauer M.J. Contamination of soil and vegetation near a zinc smelter by zinc, cadmium, copper, and lead // Environ. Sci. Technol., 1973, 7, p. 131–135.

119. Burkitt A., Lester P., Nickless G. Distribution of heavy metals in the vicinity of an industrial complex // Nature, 1972, 238, p. 327–328.

120. Chamberlain A.C. Aspects of the deposition of radioactive and other gases and particles // Int. J. Air Pollut., 1960, 3, p. 63–88.

121. Chapuis R., Roudier P. Les techniques de depollution // Face risque, 1995, № 311, p. 13–15.

122. Chan W.H., Vet R.J., Lusi M.A. et al. Airborne estimation of particulate emissions from stacks: a feasibility study // Atmos. Environ., 1980, 14, № 10, p. 1201–1203.

123. Chilingar G.V., Loo W.W., Khilyuk L.F., Katz S.A. Electrobioremediation of soils contaminated with hydrocarbons and metals: Progress report // Energy Sources, 1997, 19, № 2, p. 129–146.

124. De Kimpe C.R., Morel J.-L. Urban soil management: A growing concern // Soil Sci., 2000, 165, № 1, p. 31–40.

125. Eikmann Th., Michels S., Krieger Th., Einbrodt H.J. Entwicklungen und Tendenzen bei der Festlegung von Richtwerten für den Boden aus umweltmedizinischer Sicht // Wiss. und Umwelt., 1989, № 2, s. 77–81.

126. *Goodman G.T., Roberts T.M.* Plants and soils as indicators of metals in the air // *Nature* (London), 1970, 231, p. 287–292.
127. *Haines R.C.* Environmental contamination-surveys of heavy metals in urban soils and hazard assessment // *Trace Substances Environ. Health – XVII. Proc. Univ. Mo. 18th Annu. Conf., Columbia, Mo., 4-7 June, 1984. – Columbia, Mo., 1984, p. 450–460.*
128. <http://www.medport.ru/GSEN/grunt.html>.
129. *Kahle P.* Schwermetallstatus unterschiedlich genutzter Boden im Stadtgebiet von Rostok // *Wasser und Boden*, 2000, 52, № 12, s. 50–54.
130. *Markus J., McBratney A.B.* Urban soil and its classification with respect to heavy metal contamination // *Prigr. Environ. Sci.*, 2000, 2, № 3, p. 252–265.
131. *Paul P.G., Somers J.A., Scholte Ubing D.W.* Belasting van de boden in Nederland met zware metalen // *Ingenieur* (Ned.), 1981, 93, № 8, p. 15–19.
132. *Pisano M.A.* Nonpoint sources of pollution: a federal perspective // *J. Environ. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 1976, 102, № 3, p. 555–565.
133. *Purves D.* Contamination of urban garden soils with copper, boron, and lead // *Soil*, 1967, 26, p. 380–382.
134. *Purves D.* Trace Element Contamination of the Environment. – Amsterdam: Elsevier, 1977. – 260 p.
135. *Salomons W., Förstner U.* Metals in the hydrocycl. – Berlin e. a.: Springer-Verlag, 1985. – 356 p.
136. *Schwar M.J.R., Moorcroft J.S., Laxen D.P.H. et al.* Baseline metal-in-dust concentrations in greater London // *Sci. Total Environ.*, 1988, 68, p. 25–43.
137. *Stigliani W.M.* Buffering capacity: its relevance in soil and water pollution // *New J. Chem.*, 1996, 20, № 2, p. 205–210.
138. *Tadesse B., Donaldson J.D., Grimes S.M.* Contaminated and polluted land: a general review of decontamination management and control // *J. Chem. Technol. And Biotechnol.*, 1994, 60, № 3, p. 227–240.
139. *Thornton I.* Metal content of soil and dust // *Sci. Total Environ.*, 1988, 75, № 1, p. 21–39.
140. *Van Wijnun J.H., Clausing P., Brunekreef B.* Estimated soil ingestion by children // *Environ. Res.*, 1990, 51, № 2, p. 147–162.

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-02-4

УДК 502:171

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КРИВОЙ РАНЖИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГЕРМАНИИ

Tobias Hünter*, Anika Regett, Steffen Fattler, Andrej Guminski,
Simon Pichlmaier, Jochen Conrad, Serafin von Roon

*13-я Международная конференция по экономике энергетики и технологиям
(Дрезденский технический университет), 2019*

Исследовательский центр по экономике энергетики, Мюнхен, Германия

APPLICATION-SIDE MERIT-ORDER-CURVES FOR SYNTHETIC FUELS IN THE GERMAN ENERGY SYSTEM

*13th International Conference on Energy Economics and Technology (TU Dresden),
2019 г.*

** Forschungsgessellschaft für Energiewirtschaft (FfE), Munich, Germany,
thuebner@ffe.de*

Резюме

Сценарии политики Германии в области энергетики и климата предполагают, что к 2050 г. использование синтетических топлив будет значительно возрастать с ростом уровня устремлений по защите климата. В сценариях синтетические топлива используются также в применениях, в которых с точки зрения нынешних перспектив, будет возможна и электрификация в 2050 г. Действительно синтетические топлива используются также в областях, для которых имеются адекватные альтернативы топливу в виде возобновляемой энергии. Использован статический анализ на основе модели для создания кривых ранжирования для практического применения синтетических топлив с целью сравнения с традиционными ископаемыми топливами, а также с применениями электрификации. Это даст возможность провести начальную оценку реального экономически эффективного использования синтетических топлив.

Анализ показывает, что с учетом нынешних тенденций цен на энергоресурсы для временного горизонта до 2050 г. синтетические топлива не будут экономически обоснованным вариантом, по сравнению с традиционными ископаемыми топливами. Однако сочетание синтетических топлив с высокоэффективными технологиями типа топливных элементов даст ценовые преимущества по сравнению с альтернативами в виде традиционных ископаемых топлив. Это можно наблюдать особенно в части транспортного сектора, в котором синтетические

топлива могут оказать содействие экономической оптимальной стратегии снижения потребления ископаемых топлив. Однако при использовании синтетических топлив по сравнению с традиционной альтернативой появятся дополнительные затраты порядка 48 млрд. евро. Эти дополнительные затраты в 2 раза превышают субсидии, выделяемые в Германии в 2018 г. в соответствии Законом о возобновляемых источниках энергии. Если синтетические топлива и электрификацию сравнить с точки зрения defossilization (снижения потребления ископаемых топлив)¹, становится ясно, что имеются области, в которых синтетические топлива предпочтительнее для электрификации, с затратной точки зрения. В особенности в транспортном секторе имеются применения на основе синтетического топлива, которые можно экономически эффективно использовать для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. Кроме того, литературный обзор показал, что имеется 28% применений, когда технологии не апробированы, и может быть идентифицирован эффективный вариант электрификации для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. В транспортном секторе, в частности имеются применения на основе синтетического топлива, которые можно экономически эффективно использовать для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. Результатом применений с учетом количественно определенных затрат станут дополнительные затраты величиной 22 млрд. евро для использования синтетического топлива, по сравнению с электрификацией.

1. Мотивация

Анализ сценариев политики в области энергетики и климата показал, что ожидается расширенное использование синтетических топлив к 2050 г. в случае высокого уровня устремлений по защите климата ([1], [2], [3], [4], [5]). Только электрификации и реализации дополнительных мер по эффективности и обеспеченности будет недостаточно для достижения масштабных климатических целей ([6], [7]). Кроме того, доля кратковременных и сезонных флуктуаций энергии будет продолжать возрастать в свете Парижского соглашения по климату и решений, ориентированных на его выполнение, принятых на Климатическом саммите в Катовице². Временно это может привести к значительной остаточной нагрузке в энергетической системе, в периоды высокого спроса и низкой доли источников возобновляемой энергии ([8], [7], [9], [10]). Помимо снижения выбросов парниковых газов (ПГ), использование синтетических топлив обеспечивает кратко- и долговременную гибкость в энергетической системе, а также использование существующей инфраструктуры и торговых сетей ([11], [12], [13], [14], [7]). Однако в сложившихся условиях использование синтетических топлив вызывает риск неэффективности энергетической системы, при их возможном применении, хотя имеются более дешевые и более эффективные альтернативные меры для снижения выбросов ПГ. Помимо этого, если спрос на синтетическое топливо не

¹ Термин используется вместо декарбонизации (снижения углеродоемкости), поскольку декарбонизация должна исключать использование углеродсодержащих топлив для производства электроэнергии.

² Климатический саммит в Катовице в декабре 2018 г., на котором была принята “дорожная карта” реализации Парижского соглашения по климату 2015 г.

будет полностью покрыт в Германии, появится зависимость от источника энергии за рубежом. Вследствие отсутствия альтернатив, использование синтетических топлив ожидается главным образом в транспортном и промышленном секторе ([1], [15]). В транспортном секторе это в особенности относится к применениям, которые трудно или исходя из современной технологической перспективы невозможно электрифицировать, таким как грузовой автомобильный транспорт, перевозки судами и авиационный транспорт. В промышленности ориентация на применения в таких отраслях, как *черная металлургия* и *производство основных химических веществ*, в которых электрификация оказывается дорогостоящей или технически проблемной, и энергоносители на ископаемом топливе используются в качестве сырья ([16], [17]).

Сообщаемые в настоящее время кривые затрат для снижения выбросов ПГ не ориентированы на использование синтетических топлив [3], и в таком случае уровень детализации данных о синтетическом топливе низкий. Так как внедрение синтетических топлив часто не является самым эффективным вариантом уменьшения использования ископаемых топлив для энергетической системы, альтернативные меры с использованием возобновляемой энергии должны быть включены в процесс принятия решений. При рассмотрении возможностей делается акцент на то, какие мероприятия с синтетическими топливами необходимы, и в каких областях применения, с точки зрения выбросов ПГ, и в каких областях уменьшение использования ископаемых топлив уже будет более экономически эффективно с применением мер электрификации. Помимо неэффективности, которая может стать результатом выбора меры по снижению выбросов ПГ в индивидуальных применениях, следует определить также дополнительные затраты, которые являются результатом использования синтетических топлив, по сравнению с традиционными топливами. В результате этого дополнительные затраты в энергетическом повороте³ можно зафиксировать при использовании синтетических топлив по сравнению с нынешними традиционными технологиями [18].

2. Методологическая процедура

Для анализа использования синтетических топлив в энергетической системе Германии были составлены межотраслевые статические кривые ранжирования с временным горизонтом до 2050 г. Разработаны две стратегии исследования. С одной стороны, использование синтетического топлива сравнивали с применениями на основе ископаемых топлив в порядке ранжирования. С другой стороны, при возможности идентифицировали электрические альтернативы и сравнивали с подачей синтетического топлива в рамках анализа дифференциальных затрат⁴ как аспекта затрат. При 100% выработки электроэнергии из возобновляемых источников ожидается, что сравнение синтетических топлив и электрификации в обоих случаях приведет к почти полному снижению выбросов в энергетической системе. Следующий анализ сосредоточен на частных домовладениях, транспортном и промышленном секторе, без рассмотрения использования синтетических топлив в

³ Под энергетическим поворотом понимается взятый правительством Германии курс на постепенный отказ от углеводородной и ядерной энергетики и почти полный переход на ее возобновляемые источники.

⁴ Дифференциальные затраты – величина, на которую отличаются затраты при рассмотрении двух альтернативных решений.

секторе электроэнергетики. Это связано главным образом с тем фактом, что источники возобновляемой энергии рассматриваются как экономически осуществимый вариант для уменьшения использования ископаемых топлив в секторе электроэнергетики, исходя из предположения, что требуемая гибкость в энергетической системе может быть обеспечена со стороны потребителя, например, промышленная гибкость или зарядка автомобилей.

Методологический подход можно разделить на пять частей, как показано на рис. 2-1.

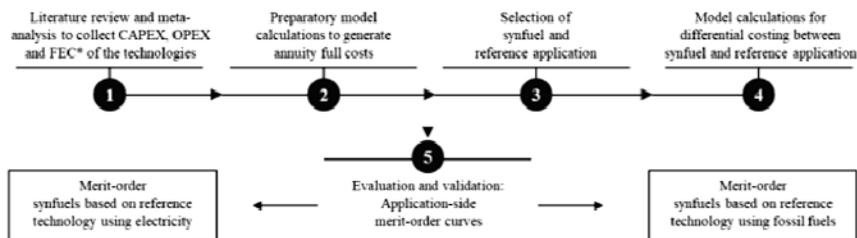


Рис. 2-1. Обзор пяти основных компонентов методологической процедуры

Пояснения к рисунку: Literature review and meta-analysis to collect CAPEX, OPEX and FEC* of the technologies – литературный обзор и мета-анализ для сбора данных о капитальных затратах, эксплуатационных затратах и полных издержках технологий, Preparatory model calculations to generate annuity full costs – подготовительная модель расчетов для определения полной стоимости аннуитета⁵, Selection of synfuel and reference applications – выбор синтетического топлива и сравнительных применений, Model calculations for differential costing between synfuel and reference application – модель расчетов для дифференциального учета затрат между синтетическим топливом и сравнительным применением, Merit-order synfuels based on reference technology using electricity – ранжирование синтетических топлив на основе сравнительной технологии с использованием электроэнергии, Evaluation and validation: Application-side merit-order curves – оценка и подтверждение кривой ранжирования для практического применения, Merit-order synfuels based on reference technology using fossil fuels – ранжирование синтетических топлив на основе сравнительной технологии с использованием ископаемых топлив

На первом этапе данные, которые требуются для построения межотраслевых кривых ранжирования, собирались с помощью литературного обзора и мета-анализа⁶ (1). В результате были идентифицированы технологии синтетических топлив и соответствующих сравнительных технологий и зарегистрированы их капитальные затраты (CAPEX) и эксплуатационные затраты (OPEX). Кроме того, было определено конечное потребление ископаемых топлив для энергетических целей сравнительной технологии. Результаты этого литературного анализа уже были опубликованы предварительно в нескольких публикациях, и они служили в качестве исходных данных в этом обсуждении. На втором этапе (2) проводились

⁵ Аннуитет – способ погашения кредита равными по величине периодическими платежами (обычно-ежемесячными).

⁶ Мета-анализ – объединение результатов нескольких исследований методами статистики для проверки одной или нескольких взаимосвязанных научных гипотез.

работы по предварительному моделированию для расчета аннуитета CAPEX и OPEX сравнительных технологий с помощью метода аннуитета с временным горизонтом до 2050 г. На третьем методологическом этапе были выбраны соответствующая технология замещения и сравнительная технология, которые сравниваются друг с другом. С одной стороны, имело место традиционное применение с использованием ископаемых топлив, с другой стороны, для сравнения использовали электрифицированное применение. В обоих случаях применение ископаемого топлива является технологией замещения. На четвертом этапе были выполнены требуемые модельные расчеты для дифференциального учета затрат между синтетическим топливом и сравнительным применением. И, наконец, была проведена оценка, подтверждение и передана для построения кривых ранжирования с помощью диаграмм Мекко⁷.

2.1. Сбор данных с помощью литературного обзора и мета-анализа

Для построения кривых ранжирования практического применения для синтетических топлив в энергетической системе Германии требуются исследование основного массива данных для технологических параметров и параметров потребления в соответствующих секторах выходной энергии. Это исследование данных не было проведено в рамках этой публикации. Для этой цели использовались секторные модели SorNA⁸ [19], TraM⁹ [20] и SmInd¹⁰ ([18], [21]). Требуемые полные затраты дифференцировались в соответствии с инвестициями и установленными эксплуатационными затратами, потреблением энергии, а также другими определенными параметрами секторных применений и их изменением до 2050 г., и они доступны во внутриотраслевых данных. Собранные данные по CAPEX включают инвестиционные затраты для нового, а также модернизируемого существующего оборудования. Потребление энергии в применениях составляет основу для расчета OPEX, которые зависят главным образом от цены энергоресурсов. Поэтому нынешние цены энергоресурсов, а также их будущее изменение должно быть установлено. Статические цены энергоресурсов рассчитывались с помощью метода расчета с модерированием “снизу-вверх” для сектора электроэнергетики.

В лежащем в основе сценарии моделирования секторов конечных потребителей энергии и цен на энергоресурсы не предполагались технологические прорывы, а скорее предвидится традиционное развитие без масштабных мер по защите климата. Системные динамические эффекты не были включены в анализ. Это означает, что изменение рыночного спроса на источники синтетической энергии не вызовет роста затрат на поставки электроэнергии или повышение цен на сами синтетические топлива. Кроме того, не рассматривается оптимизация сектора электроэнергетики. Последствия изменения системы, такого как соответствующее расширение инфраструктуры, не включены в анализ. Дополнительный доход за счет кратко- и долговременной гибкости и безопасности поставок также не рассматривается в анализе. Если не появятся дополнительные инвестиции от использования синтетических топлив в существующие применения, итоговые

⁷ Диаграмма, используемая для визуализации качественных данных по паре переменных. Это накопительные линейчатые диаграммы.

⁸ Секторная модель частных домовладений.

⁹ Транспортная модель.

¹⁰ Модель сектора промышленности.

удельные переменные издержки будут включать только эксплуатационные затраты. Для некоторых применений рассмотрено время освоения новой технологии для установления того, будут ли меняться капитальные затраты. Когда имеются трудности в оценке изменений инвестиционных затрат, связанных с применением, ожидается только небольшое воздействие на затраты, и можно пренебречь временем освоения новой техники ([22], [23]).

2.2. Подготовительная модель расчетов для определения полной стоимости аннуитета

В качестве основы для разработки технологии требуется модель расчетов индивидуальных секторов с временным горизонтом до 2050 г. Для этой цели использовали секторные модели SorNA [19], TraM [20] и SmInd [18], [21]. Секторные модели позволяют определить базовые инвестиции и постоянные эксплуатационные затраты, а также потребление энергии и внутриотраслевые параметры технологий. Во всех сравнениях использовали полные затраты на применения для проведения ранжирования синтетического топлива.

Для определения ранжирования при практическом применении для расчета капитальных затрат использовали полную стоимость аннуитета, которая включает инвестиции и постоянные эксплуатационные затраты. Аннуитет капитальных затрат рассчитывается следующим образом (уравнение 2-1):

$$a = C_0 \cdot af_{n,i} = C_0 \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (2-1)$$

Здесь: a [евро/год] – аннуитет; C_0 [евро] – начальные инвестиции/постоянные эксплуатационные затраты; af [1/год] – коэффициент аннуитета¹¹; n [лет] – срок службы технологии; i [%] – размер процентной ставки

Для расчета капитальных затрат в дополнение к переменным эксплуатационным затратам и потреблению энергии в технологии требуются цены энергоресурсов. Они оцениваются с помощью отдельного процесса моделирования и также с временным горизонтом до 2050 г. (см. раздел 3.1). Дифференцированные капитальные затраты появляются главным образом из-за различия в ценах энергоресурсов и энергоэффективности применения синтетического топлива по сравнению с ископаемыми топливами или электрической альтернативой.

2.3. Выбор синтетического топлива и сравнительной технологии

Для построения кривых ранжирования практического применения необходимо сначала наметить сравнительные технологии. Применения, которые уже электрифицированы или в которых используются источники возобновляемой энергии, не включены в предмет этого анализа. Было проведено три различных анализа, которые подытожены в табл. 2-1.

¹¹ $a = P \times (1+P)^N / (1+P)^N - 1$, где: P – процентная ставка, выраженная в сотых долях в расчете на период, N – число периодов погашения кредита.

Обзор трех проанализированных случаев

	Энергоноситель замещающего применения	Энергоноситель сравнительного применения	Характеристики анализа
Случай 1	Синтетическое топливо	Традиционное ископаемое топливо	Без технологических изменений (ТС)
Случай 2	Синтетическое топливо	Традиционное ископаемое топливо	Без ТС, использование эффективной технологии для синтетического топлива
Случай 3	Синтетическое топливо	Электроэнергия	С ТС, эффективное синтетическое топливо сравнивается с электрифицированным применением на основе FEC, относящимся к традиционному применению

* Полные издержки технологии.

Прежде всего, применения с использованием традиционного ископаемого топлива сравниваются с применениями синтетического топлива. В этом случае использование синтетических топлив не требует каких-либо технологических изменений (Случай 1). Например, в транспортном секторе обычный бензин из ископаемого топлива замещается жидким бензином, получаемым с применением электроэнергии. Этот подход аналогично применяется к другим часто используемым энергоносителям типа дизельного топлива, природного газа, керосина и нефти. В секторе частных домовладений, а также в транспортном секторе использование синтетического топлива возможно почти для всех применений, без необходимости дополнительных технологических изменений. Напротив, только потребление газа с температурой выше 500°C в соответствии с распределением температуры согласно данным [23], используется для промышленных применений. Это можно объяснить с помощью двух следующих причин: с одной стороны, ожидается, что использование синтетических топлив станет важным для уменьшения применения ископаемых топлив в высокотемпературных промышленных процессах для поставки тепловой энергии вследствие отсутствия эффективных вариантов электрификации. Это применимо также к описанным ниже случаям. С другой стороны, для использования синтетических топлив требуются технологические изменения в промышленном секторе вследствие неоднородности большинства промышленных процессов. В этой первой форме практического применения кривой ранжирования, однако, анализируются только применения без технологических изменений.

Во втором случае также сравниваются традиционное ископаемое топливо и применения синтетического топлива (Случай 2). Однако в отличие от первого случая синтетические топлива применяются для технологий, позволяющих добиться большей эффективности. Для этой цели синтетические топлива применяются для более эффективного имеющегося технологического варианта. Например, используются топливные элементы вместо традиционных карбюраторных или дизельных двигателей в транспортном секторе. Еще одним

примером является замещение котлов на жидком топливе более эффективными котлами на газообразном топливе, в качестве которого применяется синтетический метан¹² вместо природного газа в секторе частных домовладений. Кроме того, применение синтетического топлива возможно в черной металлургии и в цементном производстве. Однако выбор более эффективной технологии по сравнению со Случаем 1, например, вследствие недостатка исходных данных, невозможен ни в одном применении. Для включения полного потребления энергии в исследованных секторах конечного потребления энергии, не проводилось изменения технологии для соответствующих внутриотраслевых применений. Вместо этого использовали вариант традиционного энергоносителя на основе электроэнергии в рамках исходной технологии. Например, подобно первому случаю, в авиационных турбинах использовали синтетический авиационный керосин, полученный из диоксида углерода с применением электроэнергии вместо керосина на основе ископаемого топлива.

В третьем случае применение синтетического топлива сравнивается с вариантами электрификации. В качестве основы для конечного потребления энергии оно сравнивается с традиционным применением (Случай 3). Здесь остаются ранее выбранные более эффективные технологии синтетического топлива (Случай 2), такого типа как применения топливного элемента в транспортном секторе. Если это невозможно, используется иная альтернатива синтетического топлива. Например, это применяется для мотоциклов, когда использование топливного элемента недоступно. Кроме того, в некоторых случаях вообще отсутствует сравнительная технология с применением электрификации. Например, при рассмотрении подсектора авиационного транспорта с технологической точки зрения, не имеется эффективного способа для применений электрификации вследствие больших преодолеваемых расстояний. Тем не менее, для рассмотрения в целом применения энергии в случае практического применения кривой ранжирования не электрифицированные применения добавляются к левому краю ранжирования без определения их затрат. В третьем случае оба пути включают также трансформацию энергетической системы (связанную со снижением потребления ископаемых топлив). Если различие между электрической альтернативой и применением синтетического топлива представлено в порядке ранжирования, в рамках данных предположений, можно сделать вывод, что все меры, находящиеся ниже оси абсцисс, могут быть использованы для экономически эффективного снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе.

Возрастающее использование биомассы также не является также анализа, так как потенциал устойчивого применения биомассы, произведенной на территории страны, уже почти полностью использован¹³ [24], [25]. Вода и CO₂, которые необходимы главным образом как основные материалы для производства синтетических топлив, не имеют ограничивающего эффекта [25]. В исследовании также предполагается, что синтетические топлива производятся полностью с использованием возобновляемой энергии.

¹² Синтетический метан получают с помощью реакции метанирования, представляющей собой превращение оксида и диоксида углерода в метан.

¹³ Должен быть возможен межотраслевой сдвиг, но он не включен в данное рассмотрение.

2.4. Модель расчетов для построения кривых ранжирования для практического применения

Если применение синтетического топлива сравнивается с его альтернативами в виде ископаемого топлива или электроэнергии, компоненты затрат в кривых ранжирования являются результатом различий между обоими типами применений. В математических терминах это можно выразить следующим образом (уравнение 2-2):

$$\Delta \text{costs}_{\text{app}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{CAPEX}_{\text{syn},i} - \text{CAPEX}_{\text{ref},i}) + \sum_{j=1}^k (\text{OPEX}_{\text{syn},j} - \text{OPEX}_{\text{ref},j})}{\text{FEC}_{\text{conv,app}}} \quad (2-2)$$

Здесь: Δcosts [€/kWh]: удельная разность затрат [евро/кВтч], CAPEX [€] – капитальные затраты [евро], ref [dl]: показатель сравнительной технологии; dl – безразмерный, FEC [kWh]: конечное потребление энергии [кВтч], app [dl] – индекс применения, OPEX [€] – эксплуатационные затраты [евро], syn [dl] – индекс технологии с применением синтетического топлива, conv [dl] – индекс традиционной технологии

Итоговые различия в затратах объединены по секторам для каждого пятилетнего цикла в период с 2020 по 2050 гг. Впоследствии приоритетом стала разница в затратах, с использованием убывающего порядка от самой низкой до самой высокой пары применения. Для каждой пары в качестве основы брали конечное потребление энергии сравниваемого традиционного применения. В этом применении подытожены все моделируемые исходные параметры, что дало возможности для понимания и воспроизводства результатов моделирования, а также проведения дополнительного анализа чувствительности. В обоих случаях представлены удельное потребления энергии на функциональную единицу при традиционном использовании и удельные значения эксплуатационных и капитальных затрат модельных расчетов.

2.5. Оценка: практическое применение кривых ранжирования

Для построения кривых ранжирования в случаях практического применения оценивали расчетные данные, проверяли правдоподобие и делали заключительное подтверждение. Впоследствии результаты моделирования переводили в диаграммы Мекко (см. сноску 7).

В первых двух случаях для сравнения синтетического топлива и традиционных применений имеется два возможных результата. Либо традиционное применение дешевле по сравнению с синтетическим применением, либо наоборот (1 и 2). Результаты для Случая 1 представлены для 2020 и 2050 гг. С одной стороны, эта оценка может использоваться для демонстрации снижения цен на синтетическое топливо параллельно с непрерывным ростом цен на ископаемые топлива. С другой стороны, это отражается на росте общей эффективности в период с 2020 по 2050 гг. вследствие улучшений, относящихся к эффективности использования ресурсов, материалов и энергии. Результаты для Случая 2 показаны на кривых ранжирования только для 2050 г.

Напротив, при сравнении вариантов электрификации с использованием синтетических топлив можно выявить три различных результата: в случае мер электрификации снижение потребления ископаемых топлив будет экономически более эффективно, чем использование мер с синтетическим топливом, или наоборот

(1 и 2). Помимо этого, результаты могут указывать на отсутствие альтернативного технологически апробированного варианта электрификации для применений с уменьшенным использованием ископаемых топлив (3). В третьем случае аналогично второму случаю представлена только одна кривая ранжирования для 2050 г.

Так как в рамках исследования сделан анализ 52 различных применений, классификация применений на кривых ранжирования представлена с использованием метода аннотации¹⁴, как показано на рис. 2-2.

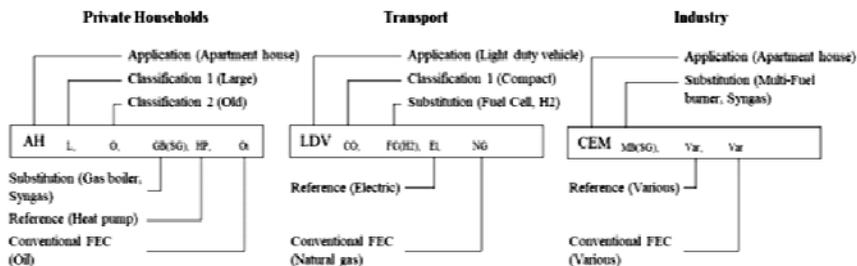


Рис. 2-2. Метод аннотации для практического применения кривых ранжирования

Пояснения к рисунку: Private Households – частные домовладения, Transport - транспорт, Industry- промышленность, Application (Apartment house) – применение (жилой дом), Classification 1 (Large) – классификация 1 (с большой площадью), Classification 2 (Old) – классификация 2 (старый дом), Application (Light duty vehicle) – применение (легковой автомобиль), Classification 1 (Compact) – классификация 1 (“компакт” – небольшого размера), Substitution (Fuel Cell, H₂) – замещение (топливный элемент, водород), Substitution (Multi-Fuel burner, Syngas) – замещение (мультитопливная горелка, синтетический газ), Substitution (Gas boiler, Syngas) – замещение (котел на газовом топливе, синтетический газ, Reference (Heat pump) – сравнительное применение (тепловой насос), Conventional FEC (Oil) – традиционный топливно-энергетический комплекс (жидкое топливо), Reference (Electric) – сравнительное применение (электроэнергия), Conventional FEC (Natural gas) – традиционный топливно-энергетический комплекс (природный газ), Reference (Various) – сравнительное применение (различное), Conventional FEC (Various) – конечное потребление традиционных видов энергии (различные виды), сокращения: AH – жилой дом, L – с большой площадью, O – старый, GB (SG) – котел на газовом топливе (синтетический газ), HP – тепловой насос, Oil – жидкое топливо, LDV – легковой автомобиль), FC (H₂) – топливный элемент (водород), EI - электропривод, NG – природный газ, CEM – цементная промышленность, MB (SG) – мультитопливная горелка (синтетический газ), Var - различный

Каждая аннотация включает сокращенное обозначение исследуемого применения (например, AH – жилой дом), а также до двух дополнительных классификаций, относящихся к данному применению. Например, в жилищном секторе жилые дома различаются с точки зрения их размера и класса возраста (классификация 1 и 2). В случаях, когда данное применение имеет только одну (см. транспорт) или не имеет дополнительной классификации (см. промышленность), пропущенные аббревиатуры вообще не упоминаются в

¹⁴ Аннотации – пометки, с помощью которых программист указывает компилятору Java (строго типизированный объектно-ориентированный язык программирования) и средствам разработки, что делать с участками кода помимо исполнения программы.

аннотации технологий. После классификации применений дается сокращение замещающей технологии, вместе с соответствующим источником энергии, указанным в скобках). Например, в промышленном секторе различные технологии сжигания заменяются мультиторпливной горелкой, в которой возможно использование синтетического метана.

После замещающей технологии перечисляется сравнительная технология. Например, при сравнении электрификации и синтетических топлив электропривод (EI) сравнивается с топливными элементами (FC) в транспортном секторе. И, наконец, приводится информация о случаях потребления традиционного применения энергии для сравнения между замещающим и сравнительным применением. Например, сравнение применения электрификации и использования синтетических топлив для легковых автомобилей класса “компакт” основано на конечном потреблении ископаемого топлива, относящемся к использованию “природного газа”. Изменение в потреблении традиционного источника энергии в связи с повышенной эффективностью одной из двух технологий не выявлено в статическом варианте ранжирования.

3. Моделируемые параметры

В этом разделе дается разъяснение об исходных параметрах моделирования для построения кривых ранжирования для практического применения в модели.

3.1. Затраты на энергоносители и CO₂

Эксплуатационные затраты применений определяются главным образом ценами энергоресурсов. Единицей измерения этих цен является евро/МВтч. Большая часть значений получена либо из внешних источников или основана на собственных оценках, как показано в табл. 7-1 в Приложении А. Затраты на районное теплоснабжение, обычную электроэнергию и обычный водород основаны на сценарии BAU (обычный порядок ведения бизнеса), разработанном в проекте Dynamis¹⁵ [27] и моделировались на линейной оптимизационной модели ISAaR [28]. Затраты на синтетическое топливо основаны на приведенном в литературе подходе приведенной стоимости “от частного к общему”, с предоставлением данных об инвестиционных затратах, постоянных и переменных эксплуатационных затратах для каждой конкретной установки. В анализе рассматривается коэффициент использования с 4000 часов работы на полной мощности электролизеров. Затраты на энергоресурсы из синтетических энергоносителей на углеродной основе в значительной степени зависят от цены поставки CO₂. Для синтетически произведенных энергоносителей в 2050 г. предполагается цена за CO₂ на уровне 47 евро/т CO₂ в промышленных процессах. Это явилось результатом анализа существующих сценариев улавливания и утилизации углерода¹⁶(CCU) как варианта снижения выбросов парниковых газов (ПГ). Цена за прямое улавливание диоксида углерода из воздуха установлена на уровне 390 евро/т CO₂ в 2020 г. и 220 евро в 2050 г., на основе результатов анализа существующих сценариев моделирования [29], [30]. Следует отметить,

¹⁵ Проект норвежского научно-исследовательского института SINTEF (одной из крупнейших исследовательских организаций в Европе), предназначенный для производства водорода и электроэнергии из ископаемых топлив с улавливанием и хранением диоксида углерода.

¹⁶ Процесс улавливания углекислого газа для дальнейшего использования.

что при более длительной работе на полной мощности цены на синтетический метан (см. сноску 12) значительно снизятся.

В обоих случаях, как производство синтетического топлива, так и прямое использование электроэнергии в приложениях на основе электроэнергии, цена за энергоресурсы связаны со 100%-ным использованием источников возобновляемой энергии (2020: 50,3 евро/МВтч; 2050: 39,5 евро/МВтч. Импорт синтетических топлив не разрешен в статическом анализе. Хотя синтетические топлива на основе электроэнергии предлагают более низкие цены на энергоносители, они связаны также с высокими уровнями неопределенности в отношении политической ситуации и размера процентной ставки, преобладающей за рубежом [31].

3.2. Технологические параметры в различных секторах

В этом подразделе рассмотрены технологии и применения из секторов домашних хозяйств, транспорта и промышленности, которые представлены и описаны. Для расчета полной стоимости аннуитета (см. сноску 5) для построения кривых ранжирования использовались данные из секторных моделей FfE (исследовательского центра по экономике энергетики) SopNA (частные домовладения) (см. сноску 8) [19], TraM (транспорт) (см. сноску 9) [20] и Smlnd (промышленность) (см. сноску 10) /FfE-08 19. Все соответствующие исходные параметры подытожены в Приложениях В и С.

В секторе частных домовладений делается различие между типами зданий и возрастным группам. Следует различать четыре типа зданий. Односемейные дома являются самыми маленькими типами зданий, и соответственно имеют самое низкое конечное потребление тепловой энергии. В общем, можно наблюдать, что по мере роста площади зданий возрастает и потребность его в тепловой энергии. Жилые дома разделяются на дополнительные классы в зависимости от их размера: небольшие, средние и большие. Кроме того, имеются различия в отношении возрастных групп. Здания, построенные до 1995 г., относятся к категории “старых зданий”, а недавно построенные здания, соответственно, к категории “новых зданий”. Применения в секторе частных домовладений, рассматриваемые в ходе исследования, охватывали 66% (281 ТВтч) общего потребления тепловой энергии обычного жилого сектора в 2015 г. (429 ТВтч) [32]. Если не принимать во внимание районное теплоснабжение, уголь и лигнит, так как только котлы на жидком и газообразном топливе имеют значение для анализа, и исследованные технологии охватывали 75% (281 ТВтч) общего потребления тепловой энергии в секторе частных домовладений (375 ТВтч) [32]. Исходными параметрами с наибольшим воздействием на результаты в секторе частных домовладений являются размер (площадь) здания, удельные инвестиции, полезный срок службы и эффективность отопительной системы. Удельные инвестиции можно рассчитать с использованием расчетной мощности отопительной системы, которая, в свою очередь, зависит от размера здания. За 30 лет предполагаемый полезный срок службы котлов на ископаемом топливе значительно выше, чем у тепловых насосов воздух-воздух. Основные литературные ссылочные источники в этом отношении охватывают инвестиции [33], полезный срок службы [34] и эффективность [2] или [35]. Подробное описание, которое относится к моделированию данного сектора, представлено в работе [19].

Транспортный сектор включает широкий диапазон исследованных применений в данном тексте. Поэтому требуется масштабный, (подробный) сбор исходных данных. Оба вида транспорта – пассажирский и грузовой транспорт – включены в

сортный анализ. Что касается движения автомобильного транспорта, то в анализе сделано различие между легковыми автомобилями, мотоциклами, городскими, междугородними автобусами и грузопассажирскими автомобилями. Легковые автомобили и грузопассажирские автомобили соответственно классифицируются на основе их размера. Железнодорожный транспорт подразделяется на пассажирские поезда, поезда дальнего следования, а также грузовые поезда. В воздушном транспорте сделано различие между пассажирскими и транспортными самолетами, которые дополнительно подразделяются на самолеты бизнес и малой авиации. В водном транспорте рассматриваются только внутренние водные пути. Для расчета удельных капитальных и эксплуатационных затрат на 1 км делается дополнительное различие, относящееся к годовому пробегу применений с использованием различных типов топлива, таких как бензин, дизельное топливо и природный газ. Это делается в отношении традиционного, синтетического топлива, а также в рамках электрического анализа, так как удельные затраты (евро/км) в значительной степени зависят от годового пробега для конкретного применения. Транспортные применения, рассматриваемые в ходе этого исследования, охватывают приблизительно 100% потребления энергии традиционного ископаемого топлива в секторе в 2015 г. [36]. Самыми важными исходными переменными в этом секторе являются удельное потребление энергии на км и инвестиционные затраты для соответствующей технологии. Что касается технологий автомобильного транспорта, то следует отметить, что электромобили на аккумуляторных источниках питания имеют более низкое потребление энергии, чем сопоставимые электромобили на топливных элементах. Однако электромобили на топливных элементах имеют преимущество над традиционным применением, относящееся к их коэффициенту преобразования энергии. Кроме того, некоторые замещающие технологии имеют более низкие инвестиционные затраты, чем традиционное применение. Обзор модельных затрат в транспортном секторе представлен в работе [20].

Вследствие неоднородности промышленного сектора и соответствующих неадекватных имеющихся данных, рассмотрены только индивидуальные процессы и температурные диапазоны, которые особенно пригодны для использования синтетических топлив. Основная часть исследований относится главным образом к производству стали, цемента и извести. Помимо этого, потребление газа для поставки в процесс тепловой энергии в температурном диапазоне выше 500°C в различных отраслях промышленности рассматривается в совокупности. В этом случае рассмотрено замещение традиционного природного газа синтетическим метаном. Не ожидается, что экономически эффективная электрификация в этом температурном диапазоне может быть достигнута при нынешнем состоянии технологии к 2050 г. Анализируемые применения охватывают примерно 67% (299 ТВтч) от общего потребления энергии традиционного ископаемого топлива в промышленности (451 ТВтч) [37]. Если учитывать только потребление газа, жидкого топлива и угля (за исключением использования районного теплоснабжения и других топлив), эта процентная доля возрастет до 78% (299 ТВтч из 384 ТВтч) [37].

Технические и финансовые исходные параметры для промышленного сектора подытожены в работах [26] и [38]. Моделируемые значения для промышленного сектора можно отыскать в работе [18]. Результаты, относящиеся к кривым ранжирования для синтетических топлив, которые иллюстрируются в этой статье, находятся главным образом под влиянием переменных CAPEX (капитальные

затраты) в виде срока службы технологии и инвестиций в нее, а также факторов, воздействующих на ОПЕХ (эксплуатационные затраты). Последние находятся главным образом под влиянием удельного потребления энергии, которое установлено либо в кВтч на 1 т продукции или получено из тепловой нагрузки процесса, эффективности преобразования энергии, а также от числа часов работы процесса на полной мощности. В зависимости от моделируемого процесса, инвестиции в технологию отражают либо инвестиции для вновь проектируемого технологического маршрута (производство стали) или в адаптацию в существующую инфраструктуру, которые являются необходимыми предварительными условиями для использования синтетических топлив в соответствующем процессе (производство цемента или извести).

4. Результаты и обсуждение

Для каждого из трех анализируемых случаев, описанных в подразделе 2.3, составлены кривые ранжирования [22], отражающие сравнение синтетических топлив с применениями синтетического топлива или электроэнергии. Результаты, представленные на рис. 4-1, основаны на предположении, что синтетические топлива используются в существующих применениях ископаемых топлив без каких-либо технологических изменений.

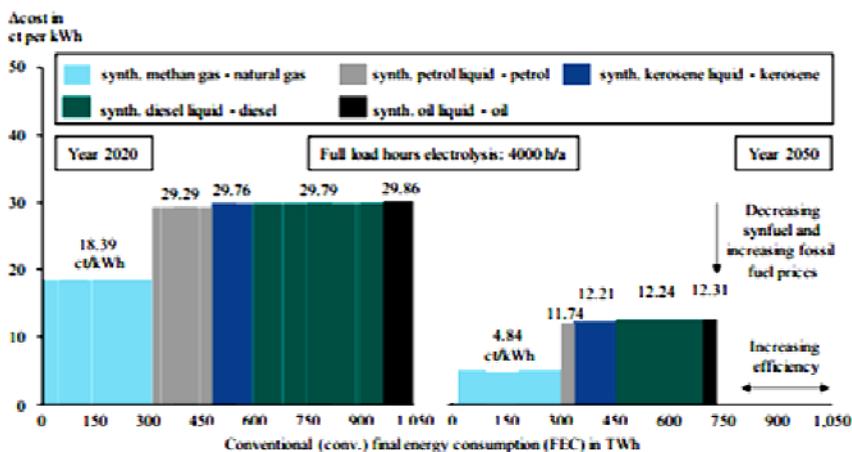


Рис. 4-1. Практическое применение ранжирования для синтетических топлив без технологических изменений в Германии в 2020 и 2050 гг. Сравнение: традиционные применения

Пояснения к рисунку: Δcost in ct per kWh – разница затрат евроцентов/кВтч, synth. methane gas – natural gas – синтетический газообразный метан – природный газ, synth. Diesel liquid – diesel – синтетическое дизельное топливо - дизтопливо, synth. petrol liquid – petrol – синтетический бензин - бензин, synth. oil liquid – oil – синтетическое жидкое топливо – жидкое топливо, synth. kerosene liquid – kerosene – синтетический керосин - керосин, Year 2020 – 2020 г., Full load hours electrolysis: 4000 h/a – полная нагрузка в часах для электролиза; 4000 ч/год, Year 2050 – 2050 г., ct/kWh – евроцентов/кВтч, Decreasing synfuel and increasing fossil fuel prices – снижение цен на синтетическое топливо и повышение цен на ископаемое топливо, Increasing efficiency – повышение эффективности, Conventional final energy consumption (FEC) in TWh – конечное потребление энергии традиционных источников в ТВтч

Итоговая кривая ранжирования на 2020 г. показана с левой стороны рис. 4-1, а на 2050 г. с правой стороны рис., соответственно. Получается, что если применения сравниваются только на основе замены энергоносителя без технологических изменений, с учетом равного энергопотребления и капитальных затрат для сравнительного применения и применений с синтетическими топливами, итоговая разница затрат не зависит от конкретного применения и сектора, а только от удельных энергозатрат различных источников энергии. Следовательно, без технологических изменений она будет зависеть только от стоимости энергии (энергоносителей), если будет достигнут ценовой паритет между синтетическими и традиционными топливами. Поэтому ценовое различие определяется исключительно ценами на энергоносители.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование синтетических топлив для чистого замещения энергии приводит к равным затратам для применений в транспорте¹⁷, жилых домах¹⁸ и промышленности¹⁹. Поэтому те же самые энергоносители можно обобщить по применениям. Синтетическое дизельное топливо используется также в транспортных средствах различных классов, когда не изменяющееся потребление энергии и инвестиционные затраты для сравнительного и замещающего применения определяют только цены на энергоносители путем дополнительных затрат на замещение. Это также означает, что пока затраты на электроэнергию будут выше, чем затраты на ископаемые топлива, топлива, полученные с использованием электроэнергии, не смогут достичь ценового паритета или даже ценового преимущества перед традиционными ископаемыми топливами. Однако в случае практического применения цены за CO₂ дадут возможность получения ценового преимущества для синтетических топлив с точки зрения участника рынка, даже при более низкой стоимости традиционных топлив.

Если, например, синтетический бензин, полученный с использованием электроэнергии, будет замещать традиционный бензин в транспортном секторе, не будет соответствующих технологических изменений, и, поэтому, не будет изменений в потреблении энергии и капитальных затратах. Итоговая разница в затратах между синтетическими и традиционными применениями в 29,29 евроцентов/кВтч, что, таким образом, соответствует только разнице между ценой на энергоресурсы в виде синтетического бензина (34,42 евроцентов/кВтч) и обычного бензина (5,13 евроцентов/кВтч). Это соображение действительно для всех других пар энергоносителей, представленных на рис. 4-1. К 2050 г. разница в затратах станет ниже, так как значительно снизятся цены на топливо, получаемое с использованием электроэнергии, вследствие снижения цен на электроэнергию в связи с использованием источников возобновляемой энергии.

Конечное потребление энергии в виде традиционных источников в 2050 г. значительно снизится в большинстве применений вследствие повышения энергоэффективности. Следует отметить, что с возрастанием мощностей для производства синтетических топлив и в связи с экономией масштаба в области производства крупных электролизеров, может быть достигнуто дальнейшее снижение цены. Затраты на энергоносители в виде синтетических топлив в

¹⁷ Замещение природного газа синтетическим метаном в транспортных средствах, работающих на природном газе.

¹⁸ Замещение природного газа синтетическим метаном в котлах на газообразном топливе.

¹⁹ Замещение природного газа синтетическим метаном в различных горелках.

значительной степени зависят от числа часов работы на полной мощности электролизера. Кроме того, в рамках этих и следующих соображений импорт синтетических топлив не разрешен. Если синтетические топлива импортируются из регионов с лучшими условиями для генерации энергии из возобновляемых источников, чем в Германии, ценовое различие может быть еще ниже [1], [31]. Однако дополнительные транспортные затраты и худшие инвестиционные условия типа ставки процента и менее привлекательных политических условий²⁰ могут привести к тому, что цены на синтетическое топливо будут еще дороже.

Если параллельно с замещением с замещением энергоносителя будут учитываться также технологические изменения в некоторых исследуемых применениях, результирующая эффективность и инвестиционные различия будут оказывать влияние на практическое применение кривых ранжирования. На рис. 4-2 представлены результаты сравнения между эффективными применениями на основе синтетического и традиционного топлива. Оказывается, что в 2050 г., исходя из точки зрения чисто экономической эффективности, использование синтетических топлив в конкретных применениях является более экономичным вариантом для альтернативы ископаемых топлив. Это относится к применениям, охватывающим порядка 14% (17 ТВтч) общего конечного потребления энергии в 2050 г. (857 ТВтч). Только применения в транспортном секторе превышают уровень безубыточности по сравнению с традиционными ископаемыми топливами. В частности, некоторые конкретные применения легковых автомобилей на синтетических топливах, как предполагается, намного более экономичные, чем альтернатива в виде традиционного топлива. Это можно объяснить за счет очевидно более высокой эффективности топливного элемента, по сравнению с традиционными видами топлива, такими как бензин или дизельное топливо. Несмотря на более высокие инвестиции электромобили с водородными топливными элементами могут дать экономию затрат до 20 евроцентов/кВтч, по сравнению с традиционными технологиями. Напротив, результаты сравнению, основанные на легковых автомобилях высшего класса, показывают, что в этом случае возможная экономия затрат находится под воздействием возрастающих инвестиций, связанных с более крупными топливными элементами и аккумуляторными батареями. Можно наблюдать нелинейный курс затрат на топливные элементы и аккумуляторные батареи от малых до больших систем привода. В будущем автобусы, грузопассажирские транспортные средства и внутренние водные пути также смогут эксплуатироваться отчасти дешевле с синтетическими топливами, как и с традиционными. В воздушном транспорте обычный авиационный керосин из ископаемого топлива будет заменен керосином, полученным с использованием электроэнергии вследствие отсутствия доступных альтернатив. Поэтому более высокие цены на энергоносители для синтетического керосина по сравнению с обычным керосином будут влиять только на разницу затрат. Как показано на рис. 4-1, результатом являются намного более высокие затраты (+ 12,21 евроцентов/кВтч) по сравнению с традиционным применением.

²⁰ В зависимости от региона и расстояния до места импорта.

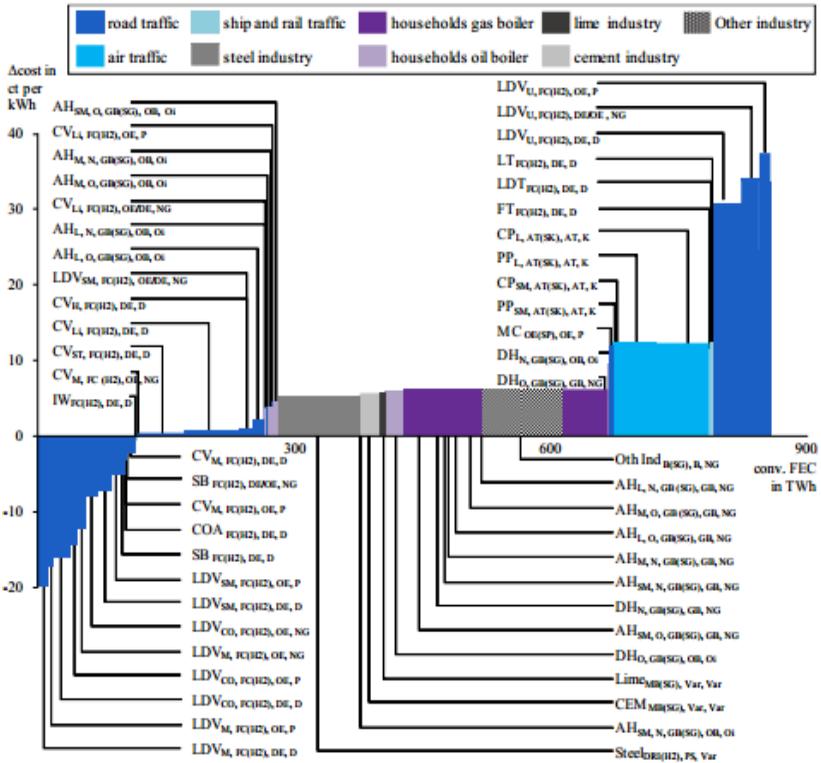


Рис. 4-2. Практическое применение ранжирования синтетических топлив в Германии в 2050 г. - Сравнение: традиционные ископаемые топлива и технологии

Сокращения: LDV – легковой автомобиль, SB – городской автобус, COA – междугородный автобус, CV – грузопассажирское транспортное средство, IW- внутренние водные пути, MC - мотоцикл, PP – пассажирский самолет, CP – транспортный самолет, FT – товарный поезд, LDT – поезд дальнего следования, LT – поезд местного сообщения, AN – жилой дом, DH – односемейный дом, Oth Ind – другие отрасли промышленности, PS – общепотребительная сталь, SM - небольшой, CO –класса “компакт”, M – средний, U – высший класс, Li - легкий, H - тяжелый, ST - полуприцеп, L - крупный, DRI – прямое восстановление железа, Cem – цементная промышленность, Lime- известковая промышленность, N - новый, O - старый, OB – котел на жидком топливе, FC – водородный топливный элемент, OE – карбюраторный двигатель, DE – дизельный двигатель, SG – синтез-газ, GB – котел на газообразном топливе, Hyd - водород, SP – синтетический бензин, SK – синтетический керосин, NG – природный газ, Oi - нефть, P - бензин, K – керосин, D – дизельное топливо, MB – мультитопливная горелка, Var – другой энергоноситель, AT – авиационная турбина

Общие дополнительные затраты по сравнению с традиционными технологиями составят 48 млрд. евро в 2050 г., считая, что все исследованные применения основаны на синтетическом топливе. Для сравнения: в соответствии с немецким “Законом об источниках возобновляемой энергии” в 2018 г. они составили свыше 25 млрд. евро [39].

На следующей стадии (рис. 4-3) каждое из упомянутых эффективных применений синтетического топлива сравнивается с их электрической альтернативой, если таковая имеется.

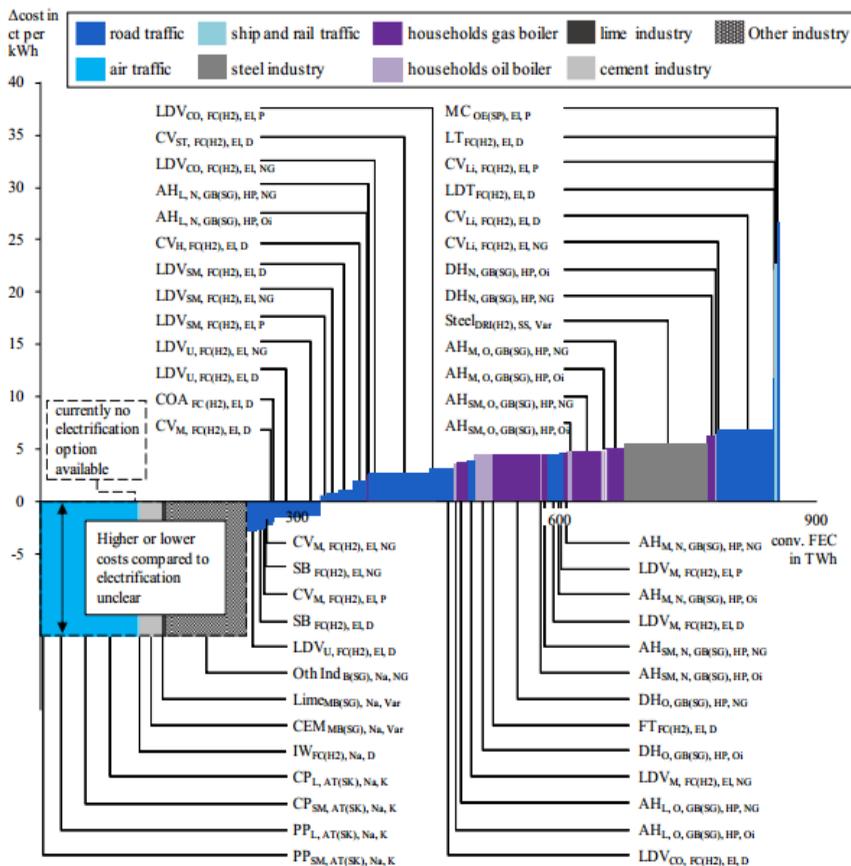


Рис. 4-3. Практическое применение ранжирования синтетических топлив в Германии в 2050 г.-сравнение: электрические технологии и применения

Пояснения к рисунку: road traffic – движение транспорта по дорогам, air traffic – движение воздушного транспорта, ship and rail traffic – движение судов и железнодорожного транспорта, steel industry – черная металлургия, households gas boiler – бытовой котел на газообразном топливе, households oil boiler- бытовой котел на жидком топливе, currently no electrification option available – в настоящее время не имеется вариант электрификации, Higher or lower costs compared to electrification unclear – нет ясности в том, будут ли затраты выше или ниже по сравнению с электрификацией, conv. FEC in TWh - конечное потребление энергии в ТВтч, сокращение: SS – сталь ограниченного применения, остальные сокращения, как на рис. 4-2

Для почти 28% (240 ТВтч) исследованных применений (857 ТВтч) невозможно было идентифицировать сопоставимой апробированной технологии и эффективных вариантов электрификации. Это относится к применениям в воздушном и внутреннем водном транспорте, цементной и известковой промышленности, а также к другим промышленным процессам, связанным с потреблением газа с температурными уровнями выше 500°C. Тем не менее, для учета энергопотребления в этих применениях, оно должно быть включено в ранжирование с фиктивными ценовыми различиями в 10 евроцентов/кВтч, относящимися к самому минимальному представленному варианту (легковые автомобили высшего класса). Подобным образом, для Случая 2 результаты демонстрируют, что синтетические топлива предположительно обеспечивают экономически эффективные варианты уменьшения потребления ископаемых топлив, по сравнению с альтернативой электрификации, относительно некоторых конкретных применений в транспортном секторе. При включении не электрифицируемых применений с использованием синтетических топлив более трети (325 ТВтч) применений относится к экономически эффективному уменьшению потребления ископаемых топлив с помощью применения синтетических топлив. Однако, если исключить не электрифицированные применения с использованием синтетических топлив, только 14% применений, которые охватывают 85 ТВтч энергопотребления, имеют более низкие затраты с системной точки зрения, учитывая использование синтетических топлив. Это соответствует доле менее 10% общего конечного потребления энергии всех исследованных применений в 2050 г. Получающиеся 14% сопоставимы со значениями, достигнутыми по результатам Случая 2 (см. рис. 4-2). Однако не выявлена причинно-следственная связь.

При исследовании ранжирования применений с синтетическим топливом и вариантом электрификации для уменьшения потребления ископаемых топлив в секторах конечного потребления энергии в порядке ранжирования выявлены четкие различия при сравнении синтетических топлив с традиционными применениями. Например, в Случае 3 легковые автомобили высшего класса, работающие на синтетическом топливе, отчасти дешевле, чем электрифицированный вариант в этом сегменте. Это связано главным образом с заметно более высокими инвестиционными затратами для крупных аккумуляторных батарей в транспортных средствах. Для гибридных автомобилей за счет дополнительного использования топливных элементов в транспортных средствах можно достичь значительно меньших суммарных затрат. Поэтому транспортные средства высшего класса с топливным элементом обеспечивают более экономически эффективный вариант уменьшения потребления ископаемых топлив, по сравнению с электрифицированной альтернативой. Этот эффект можно также наблюдать в других дорожных транспортных средствах типа городских и междугородних автобусов, для которых требуется более высокая дальность пробега вследствие высокого годового пробега. Меньшего размера и более легкие полностью электрифицированные легковые автомобили имеют меньшие суммарные затраты с системной точки зрения, несмотря на соответствующие более высокие инвестиции. Это связано с их значительно более низкими эксплуатационными затратами на км пробега. То же самое применимо к транспортным средствам типа “компакт” и среднего класса. Удивительно, что вариант электрификации является экономически более эффективным

альтернативой, особенно для крупных грузопассажирских автомобилей с большой грузоподъемностью. Это связано с тем фактом, что несколько пониженные капитальные затраты для применений с синтетическим топливом оказывают меньшее влияние на разницу в затратах, по сравнению с повышенной экономией вследствие эксплуатационных затрат, обеспеченной электрифицированным вариантом, относящимся к конкретной технологии высокого годового пробега. Как ожидается, применения железнодорожного транспорта, который в настоящее время уже электрифицирован, станут намного более экономически эффективным вариантом для уменьшения использования ископаемых топлив, по сравнению с использованием синтетических топлив в 2050 г. Что касается мотоциклов, для которых не имеется варианта с топливными элементами, то на результаты будет оказывать влияние использование жидких топлив, полученных с использованием электроэнергии. Поэтому сравнение вариантов с синтетическим топливом с их электрической альтернативой для этого случая приведет к самой высокой разнице в затратах среди всех оцененных применений.

В частных домовладениях электрификация с помощью тепловых насосов является экономически более эффективным вариантом уменьшения потребления ископаемых топлив по сравнению с альтернативой в виде синтетических топлив. Этот результат находится в соответствии с большинством сценариев энергетической и климатической политики, который свидетельствует о широком использовании тепловых насосов в секторе домашнего хозяйства ([3], [40], [4]). В соответствии с дополнительными исследованиями в области энергетики и климата, синтетические топлива редко используются в секторе домашнего хозяйства. В низкотемпературном тепловом диапазоне в дополнение к тепловым насосам предполагается, что использование электродных котлов²¹ станет эффективным вариантом электрификации, но эта технология не оценивалась в работе. В отличие от использования синтетических топлив применение электрификации обеспечивает экономию затрат, особенно в небольших частных домах. По мере увеличения площади дома издержки за счет электрификации снижаются не пропорционально тепловой нагрузке, с системной точки зрения, вследствие больших инвестиций для более крупных воздушных тепловых насосов, по сравнению с котлами на газообразном топливе. Тем не менее, воздушные тепловые насосы являются все еще более подходящим выбором в этом сегменте, благодаря их более низким эксплуатационным затратам, что связано с более низкой ценой за электроэнергию, по сравнению с ценами на синтетические топлива.

Для исследованных процессов в промышленности почти не имеются варианты электрификации. Только производство стали ограниченного применения можно сравнить с процессами прямого восстановления и плавления в электродуговой печи. Основой для сравнения является традиционное потребление энергии для производства общепотребительной стали. Для

²¹ Электродный котел – электрический водонагреватель, не использующий нагревательных элементов. Процесс нагрева в таком котле происходит при протекании электрического тока через теплоноситель, за счет электрического сопротивления которого и происходит нагрев. В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода с добавкой поваренной соли.

рассмотренного потребления в цементной и известковой промышленности, а также промышленного потребления газа с температурой выше 500°C не имеется апробированной технологии и эффективного варианта электрификации. Если сравнивать прямое восстановление и производство стали ограниченного применения, то для последнего не имеется очевидного ценового преимущества. Это связано с тем, что для производства стали ограниченного применения как капитальные, так и эксплуатационные затраты ниже. Следует отметить, что производство во всем мире стали на основе лома черных металлов в 2050 г. не является реалистичным сценарием вследствие достаточного наличия запасов лома [41]. Поэтому для полного отказа от использования ископаемых топлив в производстве стали в черной металлургии потребуются прямое восстановление с водородом.

Ранжирование дает неоднородные результаты в отношении различных проанализированных секторов, хотя применения в различных секторах находятся в близком диапазоне в отношении общих удельных затрат. Межотраслевое ранжирование можно проводить отличным способом от представленного здесь, с существенным изменением. Анализ чувствительности не является частью исследованных вопросов, но его следует иметь в виду как важный аспект при проведении будущих работ в этой области. В общем, если в исследованных применениях перейти на синтетические топлива, затраты системы возрастут на 22 млрд. евро к 2050 г., по сравнению с полностью электрифицированной альтернативой уменьшения потребления ископаемых топлив.

Это утверждение не включает 240 ТВтч, относящихся к не электрифицированным применениям, невозможным с нынешней точки зрения. С учетом предполагаемой фиктивной ценовой разницы в 10 евроцентов/кВтч между синтетическими топливами и электрифицированным вариантом, общая разница в затратах снизится на 24 млрд. евро. В рамках этих условий в этом мысленном эксперименте синтетические топлива в общем оцениваются как экономически более эффективные, чем электрификация. И, наконец, следует отметить, что должно значительно снизиться обычное потребление энергии, особенно вследствие электрификации, но также и за счет использования синтетических топлив, связанного с более высокой эффективностью, по сравнению с традиционными применениями.

5. Заключение

Практические применения кривых ранжирования для синтетических топлив в энергетической системе Германии демонстрируют с точки зрения затрат, что существуют области, для которых проводится сравнение синтетических топлив с традиционными ископаемыми топливами, когда применение первых, а также применения электрификации предпочтительнее, чем применение ископаемых топлив. Замещение ископаемых топлив топливами, полученными с использованием электроэнергии, без технологических изменений выявило, что экономическая эффективность в этих случаях зависит только от цен на энергоносители. По сравнению с 2020 г. ожидается более низкое потребление конечной энергии в 2050 г., вследствие улучшений в эффективности применения. Кроме того, разница в затратах между синтетическими топливами, полученными с помощью электроэнергии, и традиционными топливами становится меньше. Это является результатом роста стоимости ископаемого топлива параллельно с

тенденцией снижения цен на электроэнергию из источников возобновляемой энергии, в сочетании с экономикой масштаба при производстве синтетического топлива. Тем не менее, без технологических изменений ни одно из исследованных применений синтетического топлива не сможет достичь ценового паритета с вариантом традиционного топлива. Это позволяет сделать вывод, что до тех пор, пока стоимость электроэнергии из синтетического топлива будет выше стоимости электроэнергии из ископаемых топлив, синтетические топлива, произведенные с использованием электроэнергии, не обеспечат рентабельности с системной точки зрения.

Напротив, с учетом технологических изменений, около 14% исследованных применений синтетических топлив могут обеспечить ценовые преимущества по сравнению с традиционным вариантом. Это связано главным образом с более высокой эффективностью, и, следовательно, с более низкими эксплуатационными затратами для применений с синтетическими топливами, что часто компенсирует их более высокие капитальные затраты. Ценовые преимущества синтетических топлив очевидны в особенности в транспортном секторе. Считая, что все исследованные применения перейдут на синтетические топлива, это приведет примерно к 48 млрд. евро дополнительных совокупных затрат по сравнению с традиционной альтернативой.

В последнем проанализированном случае применения синтетического топлива с электрической альтернативой. На основе электроэнергии, производимой из возобновляемых источников, оба варианта могут обеспечить почти полное исключение применения ископаемых топлив. Очевидно, что примерно для 28% (240 ТВтч) всех исследованных применений не имеется технологически апробированного и эффективного варианта электрификации. Кроме того, часть применений, охватывающих примерно 85 ТВтч потребности в энергии, может оказаться экономически очень эффективными при использовании синтетических топлив, чем в случае полностью электрифицированных вариантов. Однако следует подтвердить, что использование синтетических топлив, как в промышленном, так и в транспортном секторе требует параллельно частичной электрификации. Это применяется, например, к автомобилям с топливными элементами, когда динамика движения транспортных средств требует наличия аккумуляторных батарей [42]. В случае прямого восстановления железа с использованием водорода в черной металлургии требуется электродуговая печь для процесса плавления [43]. Аналогично Случаю 2, когда синтетические топлива сравнивались с традиционными применениями на основе ископаемых топлив, сравнение между синтетическими топливами и электрификацией демонстрирует, что использование синтетических топлив предлагает экономически эффективную альтернативу, особенно в транспортном секторе. Дополнительные общие издержки составляют порядка 22 млрд. евро за счет применения топлив, полученных с использованием электроэнергии (исключены не электрифицированные варианты). Учитывая, что ценовое различие составляет только 10 евроцентов/кВтч между синтетическими топливами и теоретически возможными вариантами электрификации, использование полностью синтетических топлив является более экономически эффективным, чем полностью электрифицированная альтернатива. В то время как общие утверждения дают обзор всего диапазона затрат, результаты показывают, что каждое применение следует рассматривать отдельно, для того чтобы достичь

оптимального с точки зрения затрат уменьшения использования ископаемых топлив, с системной точки зрения.

Однако следует отметить, что проведенный анализ связан со значительной неопределенностью в отношении изменения затрат на энергию и технологию. Хотя не был проведен анализ чувствительности, становится ясным, что небольшие изменения в затратах на энергоносители могут привести к значительным различиям в межотраслевом ранжировании с изменением знака дифференциальных затрат.

Затраты на инфраструктуру электроэнергетики в транспортном секторе не включены в анализ, но ожидается, что должно быть изменение результатов в направлении более интенсивного использования синтетических топлив. Однако следует отметить, что развитие водородной инфраструктуры также связано с высокими инвестициями. Развитие уже имеющейся инфраструктуры в прошлом приводило к высоким инвестиционным затратам. В связи с этим возникает вопрос, будет ли поддержание уже существующей инфраструктуры ограничивать использование некоторых высокоэффективных применений, которые экономически более выгодны, чем разработка новой технологии, адекватной в долгосрочной перспективе. Так как ранжирование позволяет провести сравнение статического ранжирования, изменяющийся спрос на данный энергоноситель не приведет к изменению его цены. Однако цена должна находиться под воздействием итогового изменения рыночного спроса, что приведет, например, к более высоким ценам на синтетические топлива. Дополнительные исследования могут расширить технологический спектр этого анализа не только в отношении дальнейших применений в транспортном секторе, секторе домашних хозяйств и промышленности, но включают также применения в коммерческой деятельности, торговле, сфере услуг и энергетике. Данные, представленные в Приложениях А, В и С, можно использовать для проведения анализа чувствительности в будущих исследованиях.

Анализ показал, что на основе выбора надлежащей технологии использование синтетических топлив можно обеспечить экономически эффективный вариант уменьшения использования ископаемых топлив, с системной точки зрения. Оказывается, что для предотвращения неэффективности в секторах конечного потребления энергии должны быть разработаны конкретные решения для применений вместо того, чтобы полагаться на однородный способ уменьшения использования ископаемых топлив, основанный, например, на полностью электрифицированных применениях. Результаты указывают, что смесь различных конкретных применений синтетического топлива и электрификации в сочетании с высоким уровнем приемлемости для принятия новых технологий представляют важнейшие элементы в направлении экономически осуществимого уменьшения использования ископаемых топлив энергетической системы. Общая экономическая эффективность системы уменьшения использования ископаемых топлив достигается лучше с помощью смеси технологий. Универсальное решение не рекомендуется вследствие разнородности секторов конечного потребления энергии. Технологическая открытость является ключом для выбора оптимального с точки зрения затрат пути к трансформации энергетической системы в направлении уменьшения использования ископаемых топлив.

Bibliografie

1. Hübner, Tobias et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele - Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) - Das Energie-Fachmagazin 10/2018. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
2. Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
3. Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
4. Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
5. Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
6. Köckhuber, Claudius; Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Die Grenzen der Elektrifizierung - Analyse und Bewertung von Green Fuels als Ergänzung zu Strom im dekarbonisierten Energiesystem in: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 8. Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017
7. Klein, Sebastian et al.: Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende. Berlin: enervis energy advisors GmbH, 2017.
8. Graf, Mario; Kattowitz: Gutes Ergebnis und ein Problem für die Schweiz. In: <https://www.energate-messenger.ch/news/188335/kattowitz-gutes-ergebnis-und-ein-problem-fuer-die-schweiz>. (Abruf am 2018-12-18); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/74lQcmk63>); Essen: energate gmbh, 2018.
9. Die Bundesregierung: Klimaabkommen von Paris wird Gesetz in: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/07/2016-07-06-ratifizierung-pariser-klimaabkommen.html> (Abruf: 29.06.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rZrhjoQj>). Berlin: Die Bundesregierung, 2016
10. Schenuit, Carolin; Heuke, Reemt; Paschke, Jan: Potenzialatlas Power to Gas - Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016
11. Vorholz, Fritz et al.: Strombasierte Brennstoffe: Für den Klimaschutz so viel wie nötig, aus Effizienzgründen so wenig wie möglich. Berlin: Agora Verkehrswende, 2018.
12. Ruhнау, Oliver et al.: Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050. Energy, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.114>
13. Philibert, Cédric: Renewable Energy for Industry: From green energy to green materials and fuels. Paris: International Energy Agency, 2017.
14. Estermann, Thomas et al.: Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. München: FfE, 2017.
15. Pichlmaier, Simon et al.: Modelling the Transport Sector in the Context of a Dynamic Energy System, 41st IAEE conference Groningen. Research Center for Energy Economics, Munich. 2018.

16. Veitengruber, Frank et al.: Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.
17. Bataille, Christ et al.: A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. In: Journal of Cleaner Production 2018 (187) 960-973. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2018.
18. Hübner, Tobias et al.: Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
19. Conrad, Jochen et al.: Modelling the Private Households Sector and the Impact on the Energy System. 41st IAEE conference 10-13 June 2018, Groningen, The Netherlands.
20. Bayer, Caspar et al.: Der Einfluss von Prognoseunsicherheiten auf CO₂-Verminderungskosten im Pkw-Bereich. In: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 11/2018. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2018.
21. Guminski, Andrej et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures (in-review). Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.
22. Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Transition Towards an "All-electric World" - Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017
23. Unger, H.; Wagner, H.-J.; et al.: Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES - Abschlussbericht zum Vorhaben 258 114 98. Bochum: Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum (LEE), 2002
24. Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.
25. Palm, Ellen et al.: Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. In: Journal of Cleaner Production 129 (2016) 548-555. Amsterdam: Elsevier, 2016.
26. Kleinertz, Britta et al.: CO₂-Verminderungskosten von Gasen - Projekt in Auftrag von EnBW Energie Baden-Württemberg AG. In: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/764-co2-verminderungskosten-von-gasen-entwicklung-statischer-co2-verminderungskostenkurven>. (Abruf am 2018-07-17); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/70yXTypsa>); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
27. Regett, Conrad, Fattler: Laufendes Projekt: Verbundprojekt Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. In: www.ffe.de/dynamis. (Abruf am 2018-05); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6zfwkHdi3>); München, München: FfE e.V., 2018.
28. Böing, Felix; Murmann, Alexander; Pelling, Christoph: ISAaR - Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung in: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/modelle-und-tools/625-isaar-integriertes-simulationsmodell> (Abruf: 12.09.2017) Archived by WebCite <http://www.webcitation.org/6tQ5Gxmi1>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2016

29. Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.
30. Schmidt, Patrick; Zittel, Werner; Weindorf, Werner; Rashka, Tetyana: Renewables in Transport 2050 - Empowering a Sustainable Mobility Future With Zero Emission Fuels From Renewable Electricity. Frankfurt am Main: FVV-Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., 2016
31. Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.
32. Umweltbundesamt (UBA): Energieverbrauch privater Haushalte. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/7879Bdqou>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.
33. Wolff, Dieter; Jagnow, Kati: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule Wolfenbüttel, 2011
34. VDI 2067 - Energieaufwand für die Erzeugung in: VDI-Richtlinien. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013
35. Günther, Danny; Miara, Marek et al.: WP Monitor - Feldmessung von Wärmepumpenanlagen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2014
36. Umweltbundesamt (UBA): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#textpart-1>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/787B88N9K>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.
37. Umweltbundesamt (UBA): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraeger-sektoren>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/787AvUk7m>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.
38. Guminski, Andrej et al.: Energiewende in der Industrie: Methodik zur Identifikation und Quantifizierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Ausgabe 12/2017). Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017.
39. ÜNB Deutschland: Prognose der EEG-Umlage 2019 nach EEV. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart: Übertragungsnetzbetreiber Deutschland, 2018.
40. Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
41. Wörtler, Martin; Schuler, Felix; Voigt, Nicole; Schmidt, Torben; Dahmann, Peter; Lungen, Hans; Ghenda, Jean-Theo: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO2 abatement potential. Boston: Steel Institute (VDEh), 2013
42. Huss, Alexander: Elektromobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle - Stand der Entwicklung und Markteinführung bei PKW in Deutschland. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2017

43. Weigel, Max: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren - Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Wuppertal: Bergischen Universität Wuppertal, 2014.
44. Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.
45. Preiszusammensetzungen - Superbenzin, Dieselmotortreibstoff, leichtes Heizöl in: <https://www.mwv.de/statistiken/preiszusammensetzung/>. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWW), 2017
46. Rohstoffpreise in: <http://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/>. Vancouver, USA: Indexmundi, 2017
47. Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
48. Pfenning, Maximilian; Gerhardt, Norman et al.: Mittel- und Langfristige Potenziale von PTL- und H2- Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen - Teilbericht im Rahmen des Projektes: Klimawirksamkeit Elektromobilität - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Kassel: Fraunhofer IWES, 2017
49. Fasihi, Mahdi et al.: Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. Lappeenranta (Finland): Lappeenranta University of Technology, 2016.
50. Fasihi, Mahdi; Bogdaniv, Dimitrii; Beyer Christian: Long-Term Hydrocarbon Trade Options for the Maghreb Region and Europe - Renewable Energy Based Synthetic Fuels for a Net Zero Emissions World in: Sustainability 2017. Lappeenranta, Finnland: School of Energy Systems, Lappeenranta University of Technology, 2017
51. Dietrich, Ralph-Uwe et al.: Erzeugung alternativer flüssiger Kraftstoffe im zukünftigen Energiesystem. In: Chemie Ingenieur Technik Vol. 90, No 1-2, 179-192. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018.

7. Приложение

В Приложении имеются основные данные для расчета дифференцированных затрат. Приложение состоит из трех основных компонентов: (1) цен на энергоносители; (2) удельных капитальных и эксплуатационных затрат; (3) удельного потребления для традиционных применений.

Приложение А: Цены на энергоносители

Таблица 7-1.

Цены на соответствующие энергоносители

Энергоноситель	Цена на энергоносители (евро/МВтч)	Цена на энергоносители (евро/МВтч)	Источник и происхождение
	2020	2050	
Каменный уголь	8,4	9,8	[44] Сценарий В, [5]
Лигнит	5,9	5,6	[44] Сценарий В, [5]
Природный газ	22,7	28,1	[44] Сценарий В, [5]
Бензин	51,3	64,3	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Дизтопливо	46,3	59,3	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Керосин	46,6	59,6	[46] и рост на основе роста цен на нефть
Нефть	40	53	[44] Сценарий В, без дальнейшего роста после 2035 г.
Легкие фракции нефти	45,6	58,6	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Сырая нефть	22,8	30,2	[47] и рост на основе роста цен на нефть
Нефтяное топливо	29,8	51,8	Собственная оценка
Биомасса	27,6	26,3	Собственная оценка
Кокс	1,7	1,7	Собственная оценка
Конвертерный и доменный газ	0	0	Собственная оценка
Другие виды топлива	3,1	3,1	Собственная оценка
Районное теплоснабжение	19,4	34,6	На основе моделирования
Обычная электроэнергия	47,4	75,6	На основе моделирования
Обычный водород	23,6	28,1	На основе моделирования
Жидкое синтетическое топливо, полученное электролизом (жидкое дизтопливо, бензин, керосин)	344,2	181,7	Расчет на основе [48], [49], [50], [51] и собственных предположений
Синтетический метан из CO ₂	218,8	88,6	Собственный расчет на основе [14]
Электролизный водород	146,3	63,6	Собственный расчет на основе [14]
Электроэнергия из возобновляемых источников	50,3	39,5	Собственный расчет на основе оценок будущей смеси RES ²² в Германии

²² Источники возобновляемой энергии.

**Приложение В: Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для различных секторов, технологий**

В следующем разделе представлены удельные капитальные и эксплуатационные затраты для традиционных применений, применений с синтетическими топливами и электрификацией, которые служат основой для выполнения ранжирования

Приложение В1: Применения с использованием традиционных технологий и ископаемых топлив

Таблица 7-2.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием ископаемых топлив
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные капитальные затраты [евро/здание]		Удельные эксплуатационные затраты [евро/здание]	
Тип здания	Возраст здания	Ископаемое топливо/применение	2020	2050	2020	2050
Дом на одну семью	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	831	758	1085	1396
		Котел на газообразном топливе	1554	1499	533	660
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	690	784	706	877
		Котел на газообразном топливе	1433	1756	349	423
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1166	1058	2144	2741
		Котел на газообразном топливе	1856	1773	1059	1032
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1073	1201	1513	1939
		Котел на газообразном топливе	1772	1992	748	925
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1631	1749	3616	4568
		Котел на газообразном топливе	2292	2172	1785	2170
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1540	1849	2709	3597
		Котел на газообразном топливе	2205	2498	1339	1686
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	2711	2457	7922	9994
		Котел на газообразном топливе	3378	3171	3911	4749
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	2657	2984	5568	7159
		Котел на газообразном топливе	3322	3556	2755	3411

Таблица 7-3.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием традиционных
ископаемых топлив в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельные капитальные затраты (евро/км)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/км)	
		2020	2050	2020	2050
Виды транспорта	Ископаемое топливо/применение				
Небольшой легковой автомобиль	Бензин	0,214	0,207	0,026	0,027
	Дизтопливо	0,118	0,148	0,019	0,019
	Газ	0,082	0,123	0,011	0,012
Легковой автомобиль класса "компакт"	Бензин	0,3	0,288	0,03	0,032
	Дизтопливо	0,166	0,209	0,023	0,023
	Газ	0,13	0,194	0,013	0,013
Легковой автомобиль среднего класса	Бензин	0,379	0,36	0,031	0,033
	Дизтопливо	0,213	0,265	0,025	0,025
	Газ	0,173	0,254	0,013	0,014
Легковой автомобиль высшего класса	Бензин	0,554	0,524	0,035	0,037
	Дизтопливо	0,265	0,33	0,031	0,031
	Газ	0,213	0,314	0,015	0,016
Мотоцикл	Бензин	0,192	0,201	0,021	0,024
Городской автобус	Дизтопливо	0,98	0,983	0,21	0,27
	Газ	1,068	1,045	0,104	0,133
Междугородный автобус	Дизтопливо	0,239	0,24	0,142	0,184
Пригородный поезд	Дизтопливо	2,143	2,184	0,372	0,476
Поезд дальнего сообщения	Дизтопливо	1,157	1,157	0,172	0,22
Небольшой пассажирский самолет	Керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой пассажирский самолет	Керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Бензин	0,347	0,381	0,053	0,06
	Дизтопливо	0,203	0,229	0,06	0,064
	Газ	0,19	0,199	0,028	0,029
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Бензин	0,261	0,248	0,099	0,113
	Дизтопливо	0,206	0,201	0,109	0,127
	Газ	0,263	0,225	0,051	0,053
Много тоннажное грузопассажирское Транспортное средство	Дизтопливо	0,37	0,368	0,156	0,152
Бортовой полуприцеп	Дизтопливо	0,325	0,355	0,202	0,198
Грузовой поезд	Дизтопливо	52,433	58,208	8,484	10,866
Небольшой транспортный самолет	Керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой транспортный самолет	Керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Суда речного сообщения	Дизтопливо	6,167	6,167	3,251	4,164

Таблица 7-4.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием
ископаемых топлив в промышленности**

Промышленный сектор	Удельные кап затраты (евро/т)		Удельные эксл. затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственный процесс	2020	2050	2020	2050
Производство стали	133	133	37	41
Цементное производство	Не определены	Не определены	9	8
Известковое производство	Не определены	Не определены	15	15
Другие отрасли промышленности (потребление газа с температурой выше 500°C)	Суммарные затраты			
Другие промышленные процессы	2020		2050	
Другие отрасли	Не определены		Не определены	
Другие отрасли промышленности без производства стали, цемента и извести	Не определены		Не определены	

Приложение В2: Применение технологий с синтетическим топливом

Таблица 7-5.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием
синтетических топлив в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные кап затраты (евро/здание)		Удельные эксл. затраты (евро/здание)	
Тип здания	Возраст здания	Применение синтетического топлива	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	831	758	8194	4329
		Котел на газе	1554	1499	5138	2083
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	690	784	5329	2720
		Котел на газе	1433	1756	3364	1334
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1166	1058	16186	8499
		Котел на газе	1856	1773	10203	4108
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1073	1201	11425	6014
		Котел на газе	1772	1992	7213	2918
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1631	1479	27297	14166
		Котел на газе	2292	2172	17203	6845
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1540	1849	20447	11155
		Котел на газе	2205	2498	12910	5318
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	2711	2457	59801	30992
		Котел на газе	3378	3171	37693	14981
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	2657	2984	42030	22201
		Котел на газе	3322	3556	26566	10761

Таблица 7-6.

Удельные капитальные и эксплуатационные затраты при использовании синтетических топлив в транспортном секторе

Транспортный сектор		Удельные кап. затраты (евро/км)		Удельные эксл. затраты (евро/км)	
Вид транспорта	Применение синтетического топлива ²³	2020	2050	2020	2050
Небольшой легковой автомобиль	Синтетический бензин	0,207	0,207	0,026	0,027
	Синтетическое дизтопливо	0,148	0,148	0,019	0,019
	Синтетический газ	0,123	0,123	0,011	0,012
	Водород (топливный элемент) бензин	0,304	0,204	0,028	0,009
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,155	0,135	0,028	0,009
	Водород (топливный элемент) газ	0,13	0,135	0,028	0,009
Легковой автомобиль класса “компакт”	Синтетический бензин	0,3	0,288	0,03	0,032
	Синтетическое дизтопливо	0,166	0,209	0,023	0,023
	Синтетический газ	0,13	0,194	0,013	0,013
	Водород (топливный элемент) бензин	0,383	0,236	0,043	0,013
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,196	0,156	0,043	0,013
	Водород (топливный элемент) газ	0,164	0,156	0,043	0,013
Легковой автомобиль среднего класса	Синтетический бензин	0,379	0,36	0,031	0,033
	Синтетическое дизтопливо	0,213	0,265	0,025	0,025
	Синтетический газ	0,173	0,254	0,013	0,014
	Водород (топливный элемент) бензин	0,173	0,254	0,013	0,014
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,466	0,289	0,05	0,016
	Водород (топливный элемент) газ	0,238	0,192	0,05	0,016
Легковой автомобиль высшего класса	Синтетический бензин	0,554	0,524	0,035	0,037
	Синтетическое дизтопливо	0,265	0,33	0,031	0,031
	Синтетический газ	0,213	0,314	0,015	0,016
	Водород (топливный элемент) бензин	0,984	0,758	0,051	0,016
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,503	0,502	0,051	0,016
	Водород (топливный элемент) газ	0,42	0,502	0,051	0,016
Мотоцикл	Синтетический бензин	0,192	0,201	0,024	0,021

²³ Топливо, произведенное с помощью электроэнергии.

Городской автобус	Синтетическое дизтопливо	0,98	0,983	0,21	0,27
	Синтетический газ	1,068	1,045	0,104	0,133
	Водород (топливный элемент) бензин	1,46	0,986	0,086	0,038
	Водород (топливный элемент) газ	1,46	0,986	0,083	0,038
Междугородный автобус	Синтетическое дизтопливо	0,239	0,24	0,142	0,184
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,365	0,25	0,056	0,025
Пригородный поезд	Синтетическое дизтопливо	2,143	2,184	0,372	0,476
Поезд дальнего сообщения	Синтетическое дизтопливо	1,157	1,157	0,172	0,22
Небольшой пассажирский самолет	Синтетический керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой пассажирский самолет	Синтетический керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Синтетический бензин	0,347	0,381	0,355	0,017
	Синтетическое дизтопливо	0,203	0,229	0,447	0,195
	Синтетический газ	0,19	0,199	0,267	0,091
	Водород (топливный элемент) бензин	0,677	0,454	0,076	0,027
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,397	0,273	0,076	0,027
	Водород (топливный элемент) газ	0,355	0,239	0,076	0,027
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Синтетический бензин	0,261	0,248	0,655	0,318
	Синтетическое дизтопливо	0,206	0,201	0,812	0,39
	Синтетический газ	0,263	0,225	0,492	0,168
	Водород (топливный элемент) бензин	0,535	0,226	0,158	0,056
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,535	0,266	0,158	0,056
	Водород (топливный элемент) газ	0,535	0,266	0,158	0,056
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Синтетическое дизтопливо	0,37	0,368	1,157	0,466
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	1,121	0,431	0,28	0,11
Бортовой полуприцеп	Синтетическое дизтопливо	0,325	0,355	1,505	0,607
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	1,375	0,424	0,365	0,143
Грузовой поезд	Синтетическое дизтопливо	52,433	58,208	63,076	33,298
Небольшой транспортный самолет	Синтетический керосин	2,677	2,677	14,853	5,8
Большой транспортный самолет	Синтетический керосин	7,024	7,024	24,272	9,478
Суда речного сообщения	Синтетическое дизтопливо	6,167	6,167	24,17	12,759
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	6,908	5,707	9,796	4,258

Таблица 7-7.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием синтетических топлив
в промышленном секторе**

Промышленный сектор	Удельные кап затраты (евро/т)		Удельные эксл. затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственный процесс	2020	2050	2020	2050
Производство стали	153	153	610	269
Цементное производство	+106 евро/т	+106 евро/т	61	33
Известковое производство	Не определены	Не определены	185	80
Другие отрасли промышленности (потребление газа с температурой выше 500°C)	Суммарные затраты			
Другие промышленные процессы	2020		2050	
Другие отрасли	Не определены		Не определены	
Другие отрасли промышленности без производства стали, цемента и извести	Не определены		Не определены	

Приложение В.3: применения электрифицированных технологий

Таблица 7-8.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные капитальные затраты, евро/здание		Удельные эксплуатационные затраты, евро/здание	
Тип здания	Возраст здания	Применение электрификации	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	2643	2298	369	263
	После 1995 г.		2220	1992	227	160
Небольшой частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	3673	3178	715	506
	После 1995 г.		3399	3131	485	340
Средний частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	5105	4396	1164	811
	После 1995 г.		4722	4453	840	595
Большой частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	12064	10344	2505	1733
	После 1995 г.		11576	10255	1687	1127

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельные капитальные затраты (евро/км)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/км)	
		2020	2050	2020	2050
Применение	Электроэнергия ²⁴ /применение				
Небольшой легковой автомобиль	Электромобиль бензин	0,296	0,206	0,006	0,004
	Электромобиль дизтопливо	0,151	0,137	0,006	0,004
	Электромобиль газ	0,126	0,137	0,006	0,004
Легковой автомобиль класса “компакт”	Электромобиль бензин	0,349	0,228	0,008	0,006
	Электромобиль дизтопливо	0,178	0,151	0,008	0,006
	Электромобиль газ	0,149	0,151	0,008	0,006
Легковой автомобиль среднего класса	Электромобиль бензин	0,409	0,274	0,01	0,007
	Электромобиль дизтопливо	0,209	0,182	0,01	0,007
	Электромобиль газ	0,175	0,182	0,01	0,007
Легковой автомобиль высшего класса	Электромобиль бензин	1,068	0,784	0,01	0,007
	Электромобиль дизтопливо	0,545	0,519	0,01	0,007
	Электромобиль газ	0,456	0,519	0,01	0,007
Мотоцикл	Электроэнергия бензин	0,172	0,166	0,004	0,003
Городской автобус	Электроэнергия дизтопливо	1,24	1,123	0,034	0,027
	Электроэнергия газ	1,24	1,123	0,034	0,027
Междугородный автобус	Электроэнергия дизтопливо	0,35	0,316	0,025	0,02
Пригородный поезд	Электроэнергия дизтопливо	1,679	1,679	0,18	0,141
Поезд дальнего следования	Электроэнергия дизтопливо	6,991	6,991	2,553	2,004
	Электроэнергия газ				
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Электроэнергия бензин	0,421	0,364	0,015	0,009
	Электроэнергия дизтопливо	0,246	0,219	0,015	0,009
	Электроэнергия газ	0,221	0,191	0,015	0,009
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Электроэнергия бензин	0,433	0,304	0,038	0,026
	Электроэнергия дизтопливо	0,433	0,304	0,038	0,026
	Электроэнергия газ	0,433	0,304	0,038	0,026
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Электроэнергия дизтопливо	0,171	0,454	0,053	0,038
Бортовой полуприцеп	Электроэнергия дизтопливо	0,623	0,431	0,068	0,049
Грузовой поезд	Электроэнергия дизтопливо	80,891	80,891	3,484	2,734

²⁴ Капитальные затраты, нормализованные к годовому пробегу для традиционной конечному энергоносителю, например, бензину, дизтопливу или природному газу

Таблица 7-10.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в промышленном секторе**

Промышленный сектор	Удельные капитальные затраты (евро/т)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственные процессы с использованием электроэнергии	2020	2050	2020	2050
Производство стали ограниченного применения	137	137	28	22

**Приложение С: Удельное потребление традиционных источников энергии
в различных секторах, с различными технологиями и применениями**

Таблица 7-11.

**Удельное потребление конечной энергии с применениями
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельное потребление (МВтч/здание)		Количество зданий	
Тип здания	Возраст здания	Применение синтетического топлива	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	23,8	23,82	2117454	877105
		Котел на газе	23,48	23,5	2999186	2347690
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	15,48	14,97	162294	85778
		Котел на газе	15,37	15,05	772807	603417
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	47,02	46,77	297448	128994
		Котел на газе	46,63	46,34	909638	743166
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	33,19	33,1	38409	23947
		Котел на газе	32,97	39,92	225642	214776
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	79,3	77,95	114949	49486
		Котел на газе	78,62	77,23	17203	6845
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	59,4	61,38	12945	8150
		Котел на газе	59,01	59,99	76020	72551
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	173,72	170,55	27634	11884
		Котел на газе	172,27	169,01	85213	69442
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	122,1	122,17	3553	2150
		Котел на газе	121,37	121,4	20866	19519

Таблица 7-12.

**Удельное потребление конечной энергии с применениями
в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельное потребление (кВтч/км)		Общий годовой пробег (млн. км)	
		2020	2050	2020	2050
Виды транспорта	Ископаемое топливо/применение				
Небольшой легковой автомобиль	Бензин	0,51	0,43	69861	16991
	Дизтопливо	0,42	0,33	83343	52528
	Газ	0,49	0,41	2551	31111
Легковой автомобиль класса "компакт"	Бензин	0,59	0,49	69724	16958
	Дизтопливо	0,51	0,4	83180	52425
	Газ	0,57	0,48	2546	31050
Легковой автомобиль среднего класса	Бензин	0,61	0,51	40229	9784
	Дизтопливо	0,54	0,42	47993	30248
	Газ	0,59	0,5	1469	17915
Легковой автомобиль высшего класса	Бензин	0,68	0,57	86264	20981
	Дизтопливо	0,66	0,51	102912	64862
	Газ	0,66	0,56	3150	38416
Мотоцикл	Бензин	0,41	0,38	18013	8802
Городской автобус	Дизтопливо	4,53	4,56	2736	1586
	Газ	4,6	4,72	100	590
Междугородный автобус	Дизтопливо	3,06	3,11	482	279
Пригородный поезд	Дизтопливо	8,03	8,03	386	374
Поезд дальнего сообщения	Дизтопливо	3,71	3,71	36	36
Небольшой пассажирский самолет	Керосин	43,15	31,92	138	145
Большой пассажирский самолет	Керосин	70,51	52,16	898	912
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Бензин	1,03	0,93	1249	220
	Дизтопливо	1,3	1,07	51508	58848
	Газ	1,22	1,03	984	3435
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Бензин	1,93	1,75	6	6
	Дизтопливо	2,36	2,15	3485	3618
	Газ	2,25	1,89	3	3
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Дизтопливо	3,36	2,56	5821	6042
Бортовой полуприцеп	Дизтопливо	4,37	3,34	19418	16821
Грузовой поезд	Дизтопливо	183,24	183,24	6	6
Небольшой транспортный самолет	Керосин	43,15	31,92	7	13
Большой транспортный самолет	Керосин	70,51	52,16	627	1168
Суда речного сообщения	Дизтопливо	70,21	70,21	45	47

Таблица 7-13.

**Удельное потребление энергии ископаемых топлив
в процессах промышленного сектора**

Промышленный сектор	Удельные потребление (кВтч/т)		Объем производства (тыс. т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственные процессы, использующие ископаемые топлива	2020	2050	2020	2050
Производство общепотребительной стали	4778,8	4778,8	26249	20008
Производство цемента	796	796	31104	28916
Производство извести	1107	1107	6605	6482
Другие отрасли промышленности (с потреблением газа с температурой > 500оС)	Потребление (ТВтч)			
Другие производственные процессы с использованием ископаемых топлив	2020		2050	
Другие отрасли промышленности	121,5		94	
Другие отрасли без производства стали, цемента и извести	120,4		93,2	

НОВЫЕ КНИГИ

Кранивин В.Ф., Потанов И.И. Окружающая среда и глобальный климат. Изд-во «Твори», 2019, Винница, Украина, 383 с.

В монографии изложены результаты исследований, проведенных авторами за последние десять лет. Основные результаты были своевременно опубликованы в российских и зарубежных журналах, многие из них в соавторстве с учеными из России, Англии, Вьетнама, Голландии, Греции, Канады, Румынии, США и Японии. Спектр этих исследований охватывал проблемы обработки данных о состоянии объектов окружающей среды с использованием моделей их функционирования и синтеза систем мониторинга изменений в окружающей среде с применением дистанционных методов зондирования земных покровов и водных поверхностей, а также технологий синтеза информационно-измерительных систем с использованием датчиков оптического и микроволнового диапазонов.

Монография нацелена на систематизацию современных данных и знаний о состоянии, динамике и распределении лесных экосистем в биосфере с учетом влияния на них природных и антропогенных факторов. В качестве конструктивного механизма для анализа этих данных и использования имеющихся знаний о лесных экосистемах предлагается экоиформатика, как новое научное направление, синтезирующее методики, алгоритмы и модели с современными техническими достижениями в области глобального мониторинга окружающей среды.

Затрагиваемые в книге проблемы охватывают широкий спектр теоретических и прикладных задач, решение которых неизбежно приводит к проблеме изучения изменений глобального климата. Поиск причин этих изменений сводится к построению геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС), охватывающей наиболее значимые прямые и обратные связи в окружающей среде.

Основными принципами ГИМС - технологии являются:

- Объединение, интеграция и координация уже существующих государственных, ведомственных и отраслевых систем сбора первичной информации об окружающей среде на единой организационной и научно-методической основе.
- Оптимизация материальных и финансовых затрат на создание, функционирование и совершенствование системы контроля окружающей среды.
- Согласование и совместимость информационных потоков в системе на основе применения единой координатно-временной системы, использования единой системы классификации, кодирования, форматов и структуры данных.
- Централизация доступа к информации через международные информационные сети с максимальным расширением списка пользователей.
- Обеспечение межнационального характера глобального геоинформационного мониторинга, не зависящего от несовпадения государственных границ с границами экосистем.

В результате соединения системы сбора информации об окружающей среде, модели функционирования геоэкологической системы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая ГИМС территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геоэкологической системы.

Построение ГИМС связано с выделением компонентов биосферы, климата и социальной среды, характерных для данного уровня пространственной иерархии. Последовательность действий по организации работ и реализации проекта ГИМС ориентируется на создание следующих ее подсистем:

- сбор и экспресс анализ данных;
- первичная обработка и накопление данных;
- компьютерное картирование;
- оценка состояния атмосферы;
- оценка состояния почвенно-растительных покровов;
- оценка состояния водной среды территории;
- оценка уровня экологической безопасности и риска для здоровья населения территории;
- идентификация причин нарушения экологической и санитарной обстановки;
- интеллектуальная поддержка компьютерных операций и средств принятия решений.

Работа состоит из семи глав. Первая глава вводит читателя в область экоинформатики с ее технологиями, алгоритмами, моделями и методиками сбора и анализа разнообразной информации о динамических процессах в окружающей среде. Дается анализ наиболее значимых процессов формирования глобального климата и их взаимосвязь с процессами в системе природа-общество. Рассматриваются критерии оценки состояния окружающей среды и вводятся индикаторы живучести и биологической сложности как показатели экологической безопасности. Анализируются подходы к глобальному моделированию как методики параметризации комплекса взаимосвязанных процессов в системе природа-общество. Основное внимание уделено совмещению понятий, устоявшихся в смежных науках с целью установления между ними универсальных понятий структуры, поведения и цели, что открывает возможность применения системного подхода к изучению экосистем, оценивая их устойчивость, разнообразие и выживание. Анализируется роль биоэкологии в формировании современного климата.

Предметом второй главы является рассмотрение интерфейса между двумя науками – климатологией и экоинформатикой. Даны понятия биоэкологии в связи с ролью наземных экосистем в формировании современного климата. Приводятся многочисленные данные и зависимости, которые характеризуют роль лесных экосистем в формировании современного климата. Оцениваются характеристики радиационного баланса на залесенных территориях. Обсуждается проблема формирования глобального баланса углерода, и рассчитываются параметры окружающей среды, которые отвечают за интерактивный характер взаимодействия климатической системы и лесных экосистем.

Третья глава рассматривает различные подходы к моделированию лесных экосистем. Объясняются принципы синтеза моделей и описываются их структуры. Основой моделирования динамики лесных экосистем является принцип оптимального структурирования биоэкологических процессов с их привязкой к информационным базам. Реализация этого принципа позволяет минимизировать сложность моделей при максимизации их информационной значимости. Рассматриваются модели составляющих лесных экосистем, включая формирование полога леса и его пространственной структуры.

Четвертая глава посвящена рассмотрению принципиальных вопросов, возникших в последние годы в связи с парниковым эффектом. Приведены модели

глобальных биогеохимических круговоротов углерода, азота, серы, кислорода, фосфора, воды и озона. В каждом случае указана роль антропогенных процессов и приведены количественные характеристики влияния этих элементов на климат.

В пятой главе изучены закономерности развития процессов урбанизации в связи с их ролью в глобальных изменениях. Рассмотрены методы диагностики наземных экосистем в различных их переплетениях с антропогенными системами. Отмечены возможности информационно-инструментальных средств радиовидения в реализации этих методов.

Глава 6 анализирует вопросы оценки роли экосистем арктического бассейна в формировании глобальных изменений окружающей среды и климата. Описаны результаты моделирования динамики радионуклидов, тяжелых металлов и углеводородов нефти в арктическом бассейне с учетом роли речного стока и наземных биоценозов. Обсуждается задача оценки роли арктических широт и зон вечной мерзлоты в глобальном круговороте углерода и метана. В качестве примера применения технологии имитационного моделирования приводятся результаты изучения уровня загрязнения речной системы Ангара-Енисей и связанного с ней эстуария Карского моря.

В главе 7 излагаются сведения о спутниковых системах, обеспечивающих оперативный контроль экосистем с оценкой их состояния и роли в формировании окружающей среды. Обсуждаются подходы к организации дистанционного мониторинга наземных и океанских экосистем и демонстрируются примеры эффективного применения современных средств мониторинга лесных пожаров, здоровья лесов и их классификации по пожарной опасности. Изложена технология синтеза систем геоэкологического информационного мониторинга и указаны их функции для обеспечения сбора и анализа многоканальной информации и принятия статистических решений о наличии или отсутствии в окружающей среде чрезвычайных ситуаций. Рассмотрена процедура синтеза мониторинговой системы, обеспечивающей воспроизведение динамики природных систем на основе фрагментарных по пространству и эпизодических во времени измерений их характеристик. Объясняются принципы организации таких систем на основе введения множества типовых идентификаторов природно-техногенных процессов и объектов. Охарактеризованы основные методы сбора данных об окружающей среде с помощью дистанционных измерений.

В целом книга содержит обширный набор данных о современной динамике наземных и океанских экосистем с указанием наметившихся тенденций и объяснением возможных последствий для глобальной экодинамики. Читатель узнает много новых сведений о различных аспектах изучения лесных экосистем с применением методов экоинформатики и получит в свое распоряжение конструктивные методики, алгоритмы и модели, которые позволят ему успешно решать широкий набор задач, возникающих при изучении лесных экосистем и их роли в изменениях климата. Приведенные в монографии знания будут способствовать развитию теории предсказуемости глобальных и региональных изменений в экосистемах различных широт на основе временных рядов спутниковых наблюдений, что обеспечит надежность описания проявлений и последствий чрезвычайных ситуаций в окружающей среде.

ЖУРНАЛЫ ОБЗОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*по Отделу научной информации по глобальным проблемам
Всероссийского института научной и технической информации ВИНТИ РАН*

1. «Проблемы окружающей среды и природных ресурсов»

В журнале публикуются обзоры и оригинальные работы по широкому кругу проблем связанных с изучением систем окружающей среды, включая вопросы оценки последствий реализации антропогенных сценариев по реконструкции земных покровов и изменения гидрологических циклов. Авторами публикаций являются известные специалисты по исследованию климата, биосферы и гидросферы. В публикациях рассматриваются задачи разработки и применения методов численного моделирования динамики окружающей среды, имея в виду обеспечение возможностей более полного анализа данных наблюдений, рассматриваются ключевые аспекты глобальной экоинформатики. Обсуждаются принципиальные проблемы численного моделирования динамики системы «природа-общество» в глобальных и региональных масштабах. Рассматриваются глобальные биогеохимические круговороты химических элементов, и в частности, углерода в связи с парниковым эффектом. Особое внимание уделяется анализу динамики окружающей среды в Арктике и ее роли в глобальных процессах. Уделяется внимание мониторингу газоконденсатных месторождений морских акваторий и эстуариев и загрязнению морских вод.

2. «Экономика природопользования»

Важная роль в решении проблем устойчивого развития общества отводится научным коммуникациям, позволяющим ознакомиться с последними достижениями в области экономики природопользования широким слоям научной общественности и специалистов-практиков, а также студентам, аспирантам и преподавателям.. Значительный вклад в эти процессы вносит журнал «Экономика природопользования», на страницах которого публикуются результаты исследований в области обеспечения устойчивого развития, безопасности жизнедеятельности и риск-анализа, организации охраны окружающей среды, разработок ресурсосберегающих технологий, региональной экономики.

В журнале публикуются обзоры и оригинальные исследования по экономическим проблемам оптимизации взаимодействия человека и природы с целью поиска эффективных стратегий природопользования, включая выработку оптимальных соотношений между затратами на охрану окружающей среды и доходами от использования природных ресурсов. Авторами публикаций являются известные специалисты по построению основ концепции управления устойчивым развитием системы природа-общество на базе математического моделирования и информационных технологий.

3. «Технологические аспекты охраны окружающей среды»

На страницах этого журнала, в основном, публикуются статьи и обзоры по проблемам отходов, малоотходной и безотходной технологиям.

Быстрый рост населения и экономический рост являются определенными причинами возрастающего истощения наших некогда обильных природных ресурсов. Скорость их истощения быстрее, чем могла бы заменить природа. В то же самое время обрабатывающие отрасли промышленности, загрязняют биосферу и ставят под угрозу выживание и разнообразие многих видов растений и животных. Вредные выбросы в воздух, водные объекты и почву препятствуют восстановлению природных ресурсов. В стремлении удовлетворения нынешних потребностей населения нельзя ставить под угрозу требования будущих поколений. Поэтому использование ресурсов требует устойчивого и комплексного управления отходами, которое является одним из важнейших аспектов использования ресурсов

Образование отходов является естественным результатом экономической и общественной деятельности хозяйствующих субъектов и потребителей, и оно происходит на протяжении всей истории человечества. С отходами связаны затраты и выгоды – природные ресурсы используются в производственных процессах, а выгоды приобретаются от потребления товаров и услуг. Ключом является обеспечение того, чтобы ценности, которые мы извлекаем из природных ресурсов, не превышали затраты на их использование. Важно также обеспечить оптимальное управление отходами с тем, чтобы затраты общества на обращение с отходами, включая природоохранные затраты, были минимизированы.

4. «Экологическая экспертиза»

На страницах журнала обсуждаются задачи проведения экологической экспертизы при оценке последствий реализации крупномасштабных антропогенных проектов, приводящих к изменению систем окружающей среды. Проведение экологической экспертизы необходимо решать задачи по оценке последствий антропогенных сценариев преобразования элементов окружающей среды. В большинстве случаев это решение реализуется на экспертном уровне, основываясь на опыте, приобретенном в прошлом. В настоящее время все большее внимание уделяется применению новейших информационных технологий, которые позволяют без ущерба окружающей среде рассмотреть самые невероятные сценарии антропогенного вмешательства в природные системы. Особенно это важно при решении глобальных проблем биосферы.

В журнале публикуются материалы по экологическому аудиту. Экологический аудит, широко применяемый в промышленно развитых государствах, наряду с решением задач по снижению экологических рисков, реализации прав граждан на благоприятную окружающую среду и обеспечению экологической безопасности на уровне отдельных организаций, производственных комплексов и территорий, выполняет и экономическую функцию – позволяет вывести предприятия на международные рынки и тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Рассматриваются вопросы оптимизации систем мониторинга окружающей среды, новые технологии синтеза гибких информационно-моделирующих систем, обеспечивающих экономический эффект при диагностике окружающей среды.

Значительный объем информационных материалов в журнале занимает оценка экологического воздействия, которая является процессом идентификации, количественного определения и оценки потенциальных эффектов, связанных с планированием предложенных действий на среды обитания, виды и экосистемы. Данные оценки могут помочь компетентным органам решать экологические проблемы более успешными методами.

Уважаемые коллеги! Большая просьба представлять для опубликования в наши журналы результаты Ваших научных, научно-исследовательских и производственных разработок.

Зав. Отделом научной информации по глобальным проблемам, к.т.н.

И. И. Потапов

e-mail: ipotapov37@mail.ru

ЭТИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИЙ

1. В настоящих правилах приведены общие принципы этики публикаций, которыми должны руководствоваться в своих взаимоотношениях участники процесса научных публикаций: авторы, рецензенты и редакторы.

2. Этика научных публикаций – это система норм профессионального поведения во взаимоотношениях авторов, рецензентов, редакторов, издателей в процессе создания, распространения и использования научных публикаций.

3. В своей деятельности редактор несет ответственность за обнародование авторских произведений, что накладывает необходимость следования следующим основополагающим принципам:

- При принятии решения о публикации редактор научного журнала руководствуется достоверностью представления данных и научной значимостью рассматриваемой работы.

- Редактор должен оценивать интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от пола, взглядов, гражданства, социального положения и предпочтений авторов.

- Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, не должны использоваться для личных целей или передаваться третьим лицам без письменного согласия автора. Информация или идеи, полученные в ходе редактирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными, и не использоваться с целью получения личной выгоды.

- Редактор не должен допускать к публикации информацию, если имеется достаточное оснований полагать, что она является плагиатом.

4. Плагиат – умышленное присвоение авторства чужого произведения науки, чужих идей или изобретений. Плагиат может быть нарушением авторско-правового законодательства и патентного законодательства и в качестве такового может повлечь за собой юридическую ответственность.

5. Для исключения возможного плагиата редактор обязан проверить рукопись статьи с использованием специального программного обеспечения.

6. Редактор не должен оставлять без ответа претензии, касающиеся рассмотренных рукописей или опубликованных материалов, а также при выявлении конфликтной ситуации принимать все необходимые меры для восстановления нарушенных прав.

7. Рецензент осуществляет научную экспертизу авторских материалов, вследствие чего его действия должны носить непредвзятый характер, заключающийся в выполнении следующих принципов:

- Рукопись, полученная для рецензирования, должна рассматриваться как конфиденциальный документ, который нельзя передавать для ознакомления или обсуждения третьим лицам.

- Рецензент обязан давать объективную и аргументированную оценку изложенным результатам исследования. Персональная критика автора неприемлема.

- Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, не должны использоваться рецензентом для личных целей.

8. Автор (или коллектив авторов) несет первоначальную ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования, что предполагает соблюдение следующих принципов:

- Авторы статьи должны предоставлять достоверные результаты проведенных исследований. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

- Авторы должны гарантировать, что результаты исследования, изложенные в предоставленной рукописи, полностью оригинальны. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любых формах, включая неоформленные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы.

- Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статье должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования.

- Авторы не должны предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

- Соавторами статьи должны быть указаны все лица, внесшие существенный вклад в проведение исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании и подготовке статьи.

- Если автор обнаружит существенные ошибки или неточности в статье на этапе ее рассмотрения или после ее опубликования, он должен как можно скорее уведомить об этом редакцию журнала.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

<i>Потанов И.И.</i> Глобализация и климат.....	3
<i>Кративин В.Ф., Шалаев В.С.</i> Сбалансированная модель глобального геохимического круговорота углерода.....	22

ОХРАНА И УЛУЧШЕНИЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

<i>Янин Е.П.</i> Химический состав и эколого-геохимические особенности городских почв. Аналитический обзор	40
--	----

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

<i>Tobias Hünter*, Anika Regett, Steffen Fattler, Andrej Guminski, Simon Pichlmaier, Jochen Conrad, Serafin von Roon.</i> Практическое применение кривой ранжирования синтетических топлив в энергетической системе Германии	74
--	----

НОВЫЕ КНИГИ

<i>Кративин В.Ф., Потанов И.И.</i> Окружающая среда и глобальный климат	112
ЖУРНАЛЫ ОБЗОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ	115
ЭТИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИИ	118

Ответственный за выпуск *И. И. Потанов*

ИД № 04689 от 28.04.01. Подписано в печать 14.01.2020. Гарнитура Таймс.
Бумага «Хехо». Формат бумаги 60 x 90 1/16. Печать цифровая. Усл. печ. л. 7,5.
Уч.-изд. л. 8,0. Тираж 44 экз.

Адрес редакции: 125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, д. 20. Тел. 499-152-55-00

Отпечатано по заказу ООО «Информнаука»
Типография «Форпринт.ру» г. Москва, М. Сухаревская пл., д. 6, стр. 1
Тел. +7 (495) 585-60-45.