

Кобец А.С., Волох П.В., Узбек И.Х., Демидов А.А., Дырда В.И.

## УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЭКОСИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

*(на примере рекультивации нарушенных земель при открытом способе добычи полезных ископаемых)*

Розглянуто проблеми стійкого розвитку техноекосистем у контексті біологічної рекультивації техногенних ландшафтів на прикладі рекультивації порушених земель при відкритому способі видобутку корисних копалин.

### STABLE DEVELOPMENT OF TECHNOECOSYSTEMS IN CONTEXT OF BIOLOGICAL RECULTIVATION OF TECHNOGENIC LANDSCAPES

Problems of stable development of technoecosystems in context of biological recultivation of technogenic landscapes are considered at the example of recultivation of disturbed soil while open mining of mineral resources.

В.І. Вернадский писал, что «человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. И перед ним, перед его мыслью и трудом, ставится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого» [1]. Техногенез *Homo sapiens* в настоящее время определяет основные антропогенные черты Земли.

Наружение природных ландшафтов обуславливает значительные изменения в окружающей среде. Горнодобывающая промышленность, особенно при использовании открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых, формирует огромные площади нарушенных земель – техногенные ландшафты.

Площадь нарушенных земель в Украине составляет 159,8 тыс. га, отработанных – 50,6 тыс. га [2]. Отдельные карьеры занимают площадь (2-4) тыс. га, а их глубина составляет до (150-200) м и более. В техногенных ландшафтах уничтожаются агро- и фитоценозы, нарушается природный почвенный покров (селективно разрабатывается), выносятся на дневную поверхность вскрышные породы разного геологического возраста и химического состава, изменяется гидрология района (региона), формируются хвосто-, золо- и шламохранилища, изменяется окружающая среда. Следует отметить, что ежегодные темпы рекультивации нарушенных земель на Украине увеличились с 19,2 (1990 г.) до 2,1 тыс. га в 2005 г.

Техноекосистемы необходимо изучать на основе системного подхода и моделирования, «эмпирического обобщения» [1], если следовать термину В.І. Вернадского. Мировое информационное поле существует и пополняется исключительно благодаря разумной деятельности человечества в целом [3].

В техноекосистемах, где антропогенно сформированы нарушенные ландшафты, техноземы, литоземы и хемоземы с ноль момента (не априорно) возможно проследить темпы эволюции вещества, биогенез, почвогенез на породах с учётом их «эволюционного полеорита» [4], на основе «пространственного и хронологического распределения геохимических процессов в земной коре» [4], которые

оказались в области современных поверхностных слоев лито-, гидро- и атмосфера.

Управление «геосоциосистемными процессами» (после выхода производственной деятельности человека за пределы биосферы) [5] осуществляет «коллективный разум» [6]. Следует отметить, что скорость создания современным человечеством техносферы и результаты её функционирования, значительно опережают процессы саморазвития естественной природы.

В практическом природопользовании человечество обязано разрабатывать концепцию устойчивого развития, «единой картины мира» [1], где все процессы подчиняются определённым законам, правилам и принципам, выработанных наукой и проверенных практикой. Познание законов общего эволюционного процесса в неживом мире, биологии и экологии на нарушенных ландшафтах будет способствовать формированию целостной системы природа – общество, где техногенез должен быть направлен на устойчивое развитие всей системы.

В.В. Докучаев [7] описал закономерные взаимодействия теории познания системы природа - общество: «вековечная и всегда закономерная связь, какая существует между силами, телами и явлениями, между мёртвой и живой природой, между растительными, животным и минеральным царством, и человеком его бытлом и даже духовным миром – с другой».

Ниже излагаются основные законы, правила и принципы, устойчивого развития техноэкосистем на примере весьма сложного процесса самоорганизации техноэкосистем и агротехносистем, т.к. они антропогенно формируются при добыче полезных ископаемых и биологической рекультивации техногенных ландшафтов, а за своей фундаментальной сущностью являются частью биосферы.

**Закон преломленных космических воздействий.** Биосфера Земли (тропо-, лито-, гидросфера) подвержена одновременному воздействию не только солнечных, но и других космических факторов. На неживое и живое вещество биосфера оказывает влияние электромагнитное поле Земли. Под его влияние протекала эволюция – геохимия и развитие организмов на нашей планете. Электрическое поле Земли направлено приблизительно вертикально, а напряжение изменяется от 130 В/м около поверхности до нескольких вольт на метр на высоте 10 км. В атмосфере возникает положительный объемный заряд, а на поверхности Земли – отрицательный заряд.

Магнитное поле Земли (магнитосфера) действует на электрические заряды, которые движутся, и тела которые имеют магнитный момент. Центр магнитного поля Земли совмещён относительно наклона оси вращения на  $11,5^\circ$ . Напряжение магнитного поля уменьшается от магнитных полюсов (55,7 А/м) к магнитному экватору (33,4 А/м). Магнитосфера простирается на (70–80) тыс. км по направлению к Солнцу и на многие миллионы километров в противоположном направлении.

Важное экологическое значение имеет периодические (суточные, сезонные, годовые) и циклические изменения электромагнитной активности планеты Земля. На поведение магнитосферы влияет солнечный ветер (400- 800 км/с), а также внезапные 5-10-минутные вспышки на Солнце, которые вызывают электромагнитное смещение в обычном потоке корпускулярных частиц.

Электромагнитные структуры имеют общепланетарный характер и оказывают сильное глобальное (аномальные геомагнитные поля, геоактивные структуры в ландшафте, геопатогенные зоны, геофлюодинамические структуры), региональное и локальное влияние на биосферу.

При открытой добыче полезных ископаемых формируются техногенные ландшафты с глубоким (до 600 м) перемещением надрудной толщи, что обуславливает изменение геофизических, геохимических и биохимических процессов в таких техноэкосистемах. В.М. Перерва [8] отмечает, что геоактивные структуры представляют собой своеобразные вертикальные и субвертикальные процессы энергомассообмена в биосфере.

Электромагнитные поля оказывают сильное влияние на почвообразование в целом и особенно на поглощающий комплекс антропогенных материнских пород (лессовидные и красно-бурые суглинки, красно-бурые и серо-зелёные глины и др.), вынесенных на дневную поверхность с различной геологической глубины их залегания.

По магнитным свойствам все вещества можно разделить на слабомагнитные и сильномагнитные. Вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции поля, называются диамагнетиками. Относительная магнитная проницаемость кремния, воды, меди и других веществ меньше единицы. Парамагнитные вещества, которые имеют вектор параллельно линиям магнитной индукции, имеют относительную магнитную проницаемость больше 1 (вольфрам, магний, алюминий и др.). Кроме этих двух групп веществ, есть ещё и ферромагнетики – вещества, в которых магнитное поле при намагничивании в тысячи раз больше, чем внешнее магнитное поле, которое его образовало. К таким веществам относится железо, кобальт, никель, гадамний.

А.Е. Ферсман [4], дополняя учение К.К. Гедройца о поглощающем комплексе, дал своё энергетическое объяснение теории связи абсорбции на основе радиуса ионов извлекаемых и замещаемых веществ.

Соотношение в валовом химическом составе вскрытых пород диа-, пара- и ферромагнетиков, их содержание в поглощающем комплексе, будет иметь отношение не только к обменной способности в техноэкосистеме, техноземах, литоземах и хемоземах, но и оказывает влияние на способность растворения, окисления, восстановления, осаждения и т.д. химических элементов.

Анализируя данные валового химического состава черноземов на лессах, можно отметить [9-11], что все химические преобразования в материнской породе с учётом факторов почвообразования, связаны главным образом с солями кремневой ( $Si$  – диамагнетик) и алюмокремневой кислотой, а также соединениями  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$ . Количество  $SiO_2$  в пахотном слое чернозема южного, чернозема обыкновенного и чернозема типичного увеличивается с юга на север с возрастанием напряженности магнитного поля соответственно на 5,1, 7,4 и 12,1 % по сравнению с материнской породой. Отметим, что содержание  $Fe_2O_3$  (ферромагнетик) в

данных подтипах чернозема практически не изменяется по генетическим горизонтам.

Вскрышные породы, которые становятся объектом сельскохозяйственного освоения и современного процесса почвообразования содержат различное количество диа-, пара- и ферромагнетиков. Так, содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в лессовидных суглинках составляет (3,2-4,7) %, в красно-буровой глине – 10,2 %. В надрудных породах содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  колеблется от (1,2-3,1) (песок кварцевый) до 22,2 % (темно-серая надрудная глина).

Аномальное влияние геоактивных структур на биогеоценозы (их оптическая характеристика) фиксируется инструментальными наблюдениями [8].

**Экологическая роль солнечной радиации. Законы гелиобиологии.** Техно-экосистемы подвергаются непрерывному энергетическому воздействию света, энергии Солнца и земных источников. Ежегодная энергия Солнца, которую принимает Земля, составляет  $5,5 \cdot 10^{24}$  Дж; мощность  $1,5 \cdot 10^{18}$  кВт. Поток энергии, поступающей на верхнюю границу атмосферы, назван солнечной постоянной. Она равна  $1,368 \text{ кВт}/\text{м}^2$ . Средняя интенсивность солнечного излучения, которое достигает земной поверхности, составляет  $342 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . В Украине интенсивность солнечной радиации изменяется с севера на юг: от ( $115$ - $145$ )  $\text{Вт}/\text{м}^2$  на Полесье до ( $185$ - $215$ )  $\text{Вт}/\text{м}^2$  в Крыму [12].

Под действием света в техноэкосистемах и антропогенных технолитоземах могут происходить реакции окисления, разложения, синтеза и др. Все гелиохимические реакции в газах, жидкостях и твёрдых телах можно разделить на пять основных групп: энергетичные, биосинтетичные, каталитичные, морфологичные и информативные. Теория гелиохимических реакций развивается на основе квантовой теории света.

Развитие сложных многофункциональных техноэкосистем, а также экологическая роль солнечной радиации в физиологии и современном почвообразовании, будет обуславливаться законом фотохимической кинетики (Я. Вант-Гоффа), законом излучения (М. Планка), законами фотохимической эквивалентности (А. Ейнштейна), принципами П.П. Лазарева и К.А. Тимирязева.

Физиологами изучена биофизика и экология фотосинтеза – процесса превращения зелёными растениями и фотосинтезирующими микроорганизмами энергии солнечного света,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в энергию химических связей органического вещества.

Общее уравнение фотосинтеза, как эндотермической реакции, следует записать:



Основной стадией фотосинтеза есть элементарный процесс окисления – восстановления, который базируется на фотоперемещениях электрона.

Фотосинтез – это гигантская биохимическая работа в биосфере Земли. По последним данным, ежегодно производимая фотосинтезом продукция составляет на уровне 170 млрд. т органического вещества, в котором накапливается  $5 \cdot 10^{17}$  ккал энергии, что намного больше, чем используется человечеством для удовле-

творения своих потребностей –  $1 \cdot 10^{17}$  ккал. Считается, что в процессе фотосинтеза на Земле усваивается до (200-300) млрд. т свободного кислорода.

Фотосинтез – «найдивовижніший феномен природи, рівень складності тих явищ, які при цьому відбуваються, є надвисокими» [9].

**Закон автотрофности зеленых растений.** Развивая содержание закона И.И. Гунара, дополнение к нему В.П. Нарцисова, М.Т. Масюк [10] назвал закон автотрофности зеленых растений первым законом биосферы. Ниже приводим определение закона, который обоснованно подходит к познанию окружающего мира и организации научно–практической деятельности для устойчивого развития сложных техноэкосистем.

«Свойство автотрофных зелёных растений использовать в процессе фотосинтеза энергетические, материальные и информационные ресурсы природной среды (солнечную радиацию, углекислоту, питательные вещества, воду и др.) и преобразовывать их (с помощью системных самоуправляемых генетических программ) в потенциально высококонцентрированные энерго-материальные вещества первичной продукции (совершенно новые формы энергии и материи), являющейся единственным и незаменимым источником жизнеобеспечения живого вещества биосферы; осуществлять обмен веществ, саморегуляцию своего строения, состава и функций; адаптироваться к изменяющимся условиям среды; изменять среду своего обитания; обеспечивать саморазвитие, воспроизведение потомства (размножение) и эволюционный прогресс.

Растительному царству (его отдельным особям, популяциям, видам, растительным сообществам, агрофитоценозам, т.е. ячейкам и элементарным незаменимым единицам биосферы) принадлежит исключительной ценности, сложности и важности уникальная функция соединения части мощного потока солнечной энергии (других космических излучений) и разобщенных в окружающей природе среде физических компонентов, поразительно разнообразных по составу и свойствам, находящихся в газообразованном, жидком и твёрдом состоянии, в биологические ресурсы – основу трофической (пищевой) пирамиды живой природы» [10].

**Закон фотохимической эквивалентности (фотоэлектрический эффект).** Экологическая роль солнечной радиации в современном почвообразовании на антропогенных литоземах (составная часть техноэкосистем) будет обусловлена фотохимическими реакциями и тепловым балансом дневной поверхности рекультивированных земель.

Среднемноголетнее значение суммарной ФАР для зоны Степи Украины составляет  $2374 \text{ мДж}/\text{м}^2$ , в т.ч. за вегетационный период (апрель-сентябрь) 75 %. При условии что 30 % солнечной радиации теряется на испарение, 50 % – на поток тепла между дневной поверхностью и верхними слоями литоземов вглубь техногенного эдафотопа, то примерно  $800-830 \text{ мДж}/\text{м}^2$  видимого излучения имеют энергетический, каталитический и биосинтетический эффект.

Резкая смена термодинамических условий – температура, давление, влажность, свет, наличие кислорода и углекислого газа – при открытой разработке по-

лезных ископаемых, влияет на скорость химической кинетики в коллоидных системах вскрышных пород. К.Д. Глинка [11] установил постепенный процесс распада силикатов и алюмосиликатов, которые аналогично фосфатам, могут сохранять кристаллическое строение, чем подтвердил явление электрогенеза в коллоидных системах.

Соотношение между количеством поглощённой энергии и количеством прореагированного вещества выражается законом фотохимической эквивалентности (А. Эйнштейн). По этому закону, каждая молекула, реагирующая под действием света, поглощает один квант радиации, вызывающей реакцию:

$$E = N_A \hbar v = N_A \hbar c / \lambda,$$

где  $N_A$  – число Авогадро;

$v$  – скорость колебаний, см·с<sup>-1</sup>;

$\lambda$  – длина волны, см;

$c$  – скорость света, см·с<sup>-1</sup>.

Таким образом, большей энергией и большей химической активностью обладают колебания с меньшей длинной волны. В видимом свете максимальной длине волны отвечает красный свет, который называется красной чертой фотоэффекта.

Спектр излучения Солнца подразделяется на ультрафиолетовые (200-400 нм), видимые (400-700 нм) и инфракрасные (больше 700 нм) части. Максимальная интенсивность излучения наблюдается при длине волны 470 нм. Для света с этой длиной приходится энергия около  $4,1 \cdot 10^{-12}$  ерг [12]. Интересно отметить, что средняя энергия отдельной молекулы газа приобретает данное значение при температуре 20000 °С. Другими словами (насколько это корректно с точки зрения термодинамики), «работа» только сотой части 1 % ультрафиолетового света (5-8 % солнечного излучения) за май месяц, на литоземах в пересчете на энергетический эквивалент дизельного топлива, составляет 59 л. Этого количества достаточно для проведения глубокой зяблевой вспашки 1 га два раза.

Если принять количество энергии для спектра 280-470 нм в среднем 100 ккал/г-атом, а эффективность возбуждения фитохимических реакций только 1 %  $\Delta 12\Delta$ , то за вегетационный период (апрель – сентябрь) в поверхностном слое антропогенно сформированных литоземов (лессовидные суглинки, красно-бурая и серо-зелёная глины), аккумулируется энергия около  $8,2 \cdot 10^6$  термохимических килокалорий. Такого количества энергии достаточно для инактивации 1312 кг кислорода или 1476 кг воды. Инактивированные  $O_2$  и  $H_2O$  колossalно влияют на неорганический круговорот веществ в техноэкосистемах на первых этапах их развития, а с течением времени (самозарастание, биологический этап рекультивации) и на связь с процессами органической жизни (микроорганизмы, агроценозы).

**Скорость и механизм химических реакций в антропогенных техноэкосистемах.** В техногенных ландшафтах, на дневной поверхности оказываются вскрышные породы различного генезиса и свойств (лессовидные и красно-бурые суглинки, красно-бурые и серо-зеленые глины, чёрные сланцевые пиритсодержащие глины и др.) в чистом виде (селективная разработка) или их смеси (валовая

разработка карьера), рекультивированные земли (техно-лито-хемоземы), шламо-золо-хвостохранилища, траншеи и внешние отвалы.

Концепция устойчивого развития техноэкосистем, которая есть парадигмой современной биосферы (ноосферы), предусматривает наиболее полный анализ потоков вещества и энергии, гармонизацию продуктивных сил, направленных на «возобновление параметров окружающей среды и приведение его в состояние, которое гарантирует безопасность жизни и здоровья человека и устойчивое развитие естественных экосистем»  $\Delta 13\Delta$ .

В.И. Вернадский ещё в 1927 г. писал: «сейчас энергетическое понимание мира вышло за рамки чисто научных интересов. Оно захватило жизнь цивилизованного человечества и все глубже в него входит» [1, 14].

До разработки карьера в геологическом разрезе верхней части литосферы (до (100-150) м) на породы влияют основные геохимические факторы (температура, давление, количество кислорода, воды, углекислого газа), которые определяют форму равновесия природного ландшафта. Перемещение вскрышных пород на дневную поверхность значительно изменяет геохимическую обстановку в техноэкосистемах – прежде всего резко изменяются термодинамические условия «на границах разнородных геосфер»  $\Delta 4\Delta$ .

В термодинамике химических процессов есть свой потенциал. Подобно механическому (гравитационному) потенциалу он убывает в самопроизвольно протекающих процессах. Для совокупности веществ при данных температуре и давлении (молярной концентрации) мерой химического сродства будет энергия Гиббса ( $\Delta G$ ). Это движущая сила процесса, «работоспособность» реагирующих веществ.

Условием принципиальной осуществимости процесса, т.е. возможность протекания реакции в прямом направлении без затраты работы, является неравенство  $\Delta G < 0$ . Чем  $\Delta G$  меньше, тем дальше система от состояния химического равновесия и тем более она реакционноспособна.

Согласно тепловых эффектов химических реакций в техногенных эдафотопах (закон Гесса, энталпия есть функция состояния системы), термодинамического (сезонная и суточная цикличность) взаимодействия системы с окружающей средой (принцип Карно – Клазиуса), а также энтропии слагающих техноэкосистему вскрышных пород, никакой информации о самом процессе почвообразовании и, в частности его скорости, которая весьма чувствительна именно к пути реакции, извлечь из  $\Delta G$  невозможно. Следует также подчеркнуть, что между принципиальной осуществимостью процесса и его практической реализацией во времени – дистанция огромного размера (возраст голоценового почвообразования (10-11) тыс. лет).

Кроме того, вопреки  $\Delta G < 0$  нередко реакцию провести не удается, так как реакционная способность системы находится в состоянии заторможенного равновесия. Нужно помнить, что любая реакция идет в энергетически наиболее выгодном направлении (простота написания реакции химическими символами не означает лёгкости её протекания).

Почвообразование (сложный антиэнтропийный процесс) на антропогенных вскрышных породах следует рассматривать как функциональную зависимость

факторов от скорости процессов в очень динамическом ряду: антропогенная материнская порода → промежуточные вещества (метабульное состояние) → продукты реакции → переходные состояния → накопление экологических ресурсов → формирование примитивных молодых почв (естественное зарастание отвалов) – формирование «антропогенного горизонта» (сельскохозяйственное использование литоземов).

Выявление и учёт среднего звена экзогенных процессов превращения в антропогенных материнских породах в общем случае чрезвычайно сложная проблема, так как в отличие от процесса исходные реагенты → продукты реакции, промежуточные продукты выделить и изучить удаётся очень редко. Перспективным направлением изучения промежуточного состояния системы почвообразования есть матричная (минеральная, органическая) модель эдафотопа, а также «молекулярное почтоведение» [15]. Они предусматривают изучение роли микропроцессов в формировании микросвойств, которые впоследствии проявляются на макроуровне.

Для открытой техноэкосистемы, в которой происходит обмен с внешней средой энергией и веществом, изменение энтропии  $dS$  можно представить как:

$$dS = d_eS + d_iS,$$

где  $d_eS$  – изменение энтропии системы за счёт обмена энергией и веществом с внешней средой;

$d_iS$  – изменение энтропии за счёт необратимых процессов, которые происходят в системе.

Поскольку  $d_iS \geq 0$ , реальные системы характеризуются необратимыми процессами, в результате чего происходит положительная смена энтропии ( $d_iS > 0$ ). Стационарному состоянию системы отвечает  $dS = 0$ .

Скорость продукции энтропии  $dS/dt$  определяется как

$$\frac{dS}{dt} = \frac{deS}{dt} + \frac{diS}{dt},$$

где  $\frac{deS}{dt}$  – скорость обмена энтропией между системой и окружающей средой;

$\frac{diS}{dt}$  – скорость продукции энтропии в результате необратимых процессов.

Мощность процессов в открытой системе определяется:

$$T \frac{dS}{dt} = \sum_i X_i l_i$$

где  $X$  – объединенная сила (фактор);

$l$  – объединенный поток (скорость процесса).

Системный подход к почвообразованию в техноэкосистемах позволяет разделить объединяющую силу (фактор) на три группы: абиотические (неорганические компоненты), биотические (биоценоз) и антропогенные (агрикультура).

Согласно теореме Пригожина в техноэкосистемах эволюция почвообразования укладывается в принцип минимума продукции энтропии в стационарном состоянии открытой системы ( $d_iS \rightarrow \min$ ).

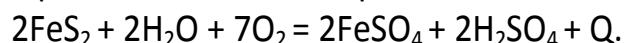
**Термодинамическое правило Вант-Гоффа-Арениуса.** Вскрышные горные породы характеризуются различной окраской от белой (мело-мергелистые глины) до тёмной (чёрные сланцевые шахтные породы). Солнечная энергия, которая поступает в техноэкосистемы, частично отражается. Величина альбедо будет определять тепловой режим в поверхностном слое пород.

Поверхность литоземов, сложенных лессовидными суглинками в первой декаде сентября (перед посевом озимой пшеницы) прогревается на  $(3,4\text{--}5,4)^\circ\text{C}$  меньше по сравнению с насыпным плодородным слоем почвы. Следует подчеркнуть, что поверхность породы охлаждается за ночное время больше, чем поверхность технозема.

Термодинамическое правило Вант-Гоффа утверждает, что с повышением температуры на  $10^\circ\text{C}$  скорость реакций увеличивается примерно в 2-4 раза. Правило это определяет только порядок изменения скорости, присущей значительной части различных химических реакций при обычных температурах.

Более точную зависимость скорости реакции от температуры опытным путём получил С. Аррениус. Предположив, что реагировать могут только молекулы, находящиеся в особой активной модификации (образуются из обычных молекул эндотермически). Из уравнения Аррениуса следует, что чем больше энергия активации, тем значительнее влияние температуры на скорость реакции.

В техноэкосистемах, сложенных углистыми пиритсодержащими сланцами или глинами (терриконы Западного Донбасса), при современном гипергенезе процесс окисления сульфидов сопровождается не только образованием сильной минеральной кислоты, но и повышением температуры. Эти процессы значительно влияют на устойчивость таких антропогенных систем часто наблюдается самовозгорание углистых пород, т.к. повышается кислотность и температура – мощные факторы изменения физико-химического равновесия:



**Катализитические процессы в техноэкосистемах.** Катализатор – это вещество, которое резко меняет скорость реакции, или вызывает её, если она не идёт, но принципиально осуществима, т.е.  $\Delta G < 0$ . Реже приходится иметь дело с явлением автокатализа, когда катализатором служит один из продуктов реакции. Скорость этих реакций возрастает во времени. Катализаторы всегда изменяют энергию активации реакции (уменьшая её при положительном катализе).

Различные катализитические реакции принято разделять на реакции гомогенного катализа и реакции гетерогенного катализа. Гомогенными катализаторами обычно служит раствор кислот, оснований, солей и прежде всего солей *d*-элементов (Fe, Mn, Co, Ni, Cu и др.). В гетерогенном катализе применяются переходные металлы, их оксиды, сульфиды и другие соединения.

Гетерогенный катализ лежит в основе каталитического производства аммиака, производства из него азотных удобрений, в т.ч. наиболее концентрированного  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  – мочевины. Можно привести много примеров гетерогенных реакций, которые имеют большое значение в сельскохозяйственном производстве, например процессы, протекающие в почве с удобрениями, химические мелиорации со-

лонцовых и кислых почв, процессы корневого питания растений, действие различных пестицидов, вносимых в эдафотоп.

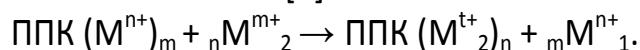
В техноэкосистемах, поверхность которых сложена вскрышными породами, образовавшиеся в кайнозойскую эру (плиоцен + плейстоцен + голоцен), основной энергетический блок геохимии процессов будет определяться: агрегатным составом, коллоидальным строением, кислородным потенциалом, который возрос в течение последних миллионов лет с 0 до 20 %, температурой, давлением, концентрацией водородных ионов и биогенезом.

В лессовидных и красно-бурых суглинках, красно-бурый и серо-зеленой глине огромную роль в каталитических процессах почвообразования будут играть минеральные коллоиды.

Электролитические явления коллоидно-дисперсных систем, открытые Ф. Рейссом, получило название электрофореза. Благодаря постоянному отрицательному заряду плиоцен - неогеновые глины способны к интенсивному поглощению катионов на стадии современного химического выветривания.

Сложность и постепенность современного химического выветривания в техноэкосистемах обусловлена образованием «диссоционных систем» «мутабильных соединений» [4] и современной фазы в кинетике гетерогенных процессов на рекультивированных литоземах.

Реакцию физико-химического поглощения почвенно-поглощающим комплексом (ППК) или «коллоидной мицеллой», «диффузным слоем коллоидной мицеллы» формально можно записать [9]:



А.Е. Ферсман [4] анализируя «блестящие по кратности тезисы К.К. Гедройца» о почвенных коллоидах дал энергетическое дополнение закономерностям обменных реакций: «величина поглощения или вытеснения есть функция валентности катиона и его атомного веса, а пропорциональность поглощения будет ... следовать пропорциональности радиуса ионов извлекаемых или замещаемых веществ».

Проводя общий обзор коллоидных систем гипергенеза А.Е. Ферсман определил, что «геохимически наиболее типичные коллоиды для следующих элементов: Si, Al, Fe, Mn, P, ...» [4].

В техноэкосистемах степной зоны Украины, сформированных третичными и четвертичными отложениями, наибольшая часть в валовом химическом составе приходится на долю соединений кремния ((42-48) % в глинах и до 95 % в кварцевом песке). Полуторные окислы алюминия и железа по качественному составу занимают соответственно второе и третье место. Отметим, что эти элементы входят в состав вторичных минералов пород и сосредоточены в их коллоидных фракциях.

Процессы, протекающие при участии биологических катализаторов – ферментов, характеризуются большой специфичностью и значительно отличаются от коллоидного химического микрогетерогенного катализа.

Биологические катализаторы превосходят активность химических катализаторов. Например, неорганический катализатор – атомная платина, уступает фер-

менту каталазе по активности в расчёте на 1 активный центр в тысячи раз; 1 моль фермента сахарозы способен расчепить 1000 моль/с свекловичного сахара; 1 г кристаллического ревина свёртывает 72 т молока. Фермент пероксидаза (ускоряет окисление субстрата) проявляет свою активность при разбавлении 1 масс.ч. фермента в  $5 \cdot 10^8$  масс. ч. воды.

В свежих образцах вскрышных пород, отобранных на разной глубине разрабатываемых уступов карьера, ферментативная активность субстратов (уреаза, фосфатаза, инвертаза) изменялась с глубиной от показателя «следы очень бедная» в лессовидных суглинках до полного отсутствия гидролитических ферментов в красно-буруй и серо-зелёной глине [16].

Интенсивность биогеохимических процессов в техноэкосистемах, динамика устойчивого развития почвообразовательного процесса при самозарастании отвалов или в фитомелиоративный период на рекультивированных техно- и литоземах, будет определяться ролью живой материи или «космической ролью жизни в целом» [1].

Направление и интенсивность биохимических процессов в верхнем слое техноэкосистем (самозарастание отвалов, техноземы, литоземы) зависит от активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов. И.Х. Узбек [16] установил, что высокое отношение ферментов инвертазы к каталазе в техногенных литоземах под бобовыми агроценозами свидетельствует о том, что в породах преобладают реакции гидролиза сложных органических соединений с высвобождением, особенно в верхнем корнеобитаемом слое, компонентов минерального питания. За 22-летний период самозарастание отвала слой 0-1 см смеси пород из лессовидного суглинка и древнеаллювиальных песков под естественным фитоценозом имел активность сахарозы в 9 раз, фосфатазы в 13, уреазы в 36, каталазы в 1,5 и дегидрогеназы в 72 разы больше, чем второй (морфологически отмечен) слой (1-6) см. Общее количество микроорганизмов составило 128,1 млн., а число олигонитрофилов возросло до 624 тыс. на 1 г абсолютно сухой навески [16].

Несмотря на относительно очень небольшую, динамическую за вегетационный период, массу микроорганизмов (в слое (0-20) см масса олигонитрофилов на литоземах составляет  $(1,6-1,7) \cdot 10^{-5}$  т/га [16], а масса минеральной части пород –  $(2,8-2,9) \cdot 10^3$  т/га) ферментативную активность субстратов в техноэкосистемах необходимо использовать как показатель развития современного почвообразования на благоприятных эдафотопах (лессовидные суглинки, красно-бурая и серо-зеленая глина) или диагностики начальных деградационных процессов во вскрышных породах. Микроорганизмы чутко реагируют на экологические условия среды обитания.

Огромный биохимический эффект в современном почвообразовании на вскрышных породах обусловлен качественными показателями микроорганизмов. Например, химический состав бактерий на (40-70) % представлен белками ферментами [9]. Исследованиями [17] установлено, что целюлозоразрушающие микроорганизмы активно выделяют аминокислоты. В культуральном растворе обнаружено 20 аминокислот, в т.ч. у бактерий – 12, у актиномицетов – 18 и у грибов –

6. Наиболее часто встречаются аланин, глютаминовая и аспаргиновая аминокислоты, лизин, гистидин и др.

**Законы биогеохимического круговорота веществ.** В техноэкосистемах область гипергенных процессов очень тесно связана с явлениями биогеохимического характера.

**Закон биогенной миграции атомов В.И. Вернадского.** В середине XIX века было сделано важнейшее научное обобщение качественной роли «живого вещества», «живой материи» в биосферных процессах. Рассматривая роль живого вещества в биохимических процессах и особенно биогеохимических реакциях, В.И. Вернадский пользуется понятиями «вихрей химических элементов», «геохимических циклов», «круговорот атомов, в которых принимает участие биогенная миграция химических элементов в организмах» [1]. Миграция химических элементов в целом осуществляется при непосредственном участии живого вещества (биогенная миграция) или в среде, геохимические особенности которой обусловлены живым веществом – историческое определение закона В.И. Вернадского.

В техноэкосистемах (открытая в термодинамическом смысле система, имеющая вход и выход по энергии и веществу) круговорот потоков энергии и миграции веществ будет проходить как в вскрышных породах («былых биосферах» [1]), так и между соседними элементами ландшафта, биогеоценозами, агроэкосистемами, атмосферой и природными водами в структурно-функциональном ряду: техноэкосистема – геохимический ландшафт – биосфера.

Анализируя природное функционирование техноэкосистем [10] на основании признаков пионерных фитоценозов (флористический состав, биоэкологические группы растений, скорость и характер формирования фитоценозов, сукцессионные признаки) разработал эколого-эдафичный ряд вскрышных пород по мере возрастания дефицита трофности: лессовидные суглинки – красно-бурые суглинки, песчано-глинистые отложения – черные сланцевые глины. В типе техноэкосистем (валовая вскрыша карьера) определенную негативную роль играет антропогенное формирование на дневной поверхности карьера пород с неблагоприятными (вредными) свойствами. Экологический объем формирования таких системах будет определяться физико-химическим началом вскрышных пород. Например, на отвалах чёрных сланцевых глин пионерная растительность отсутствует даже на 5-6 год после их формирования, что связано с интенсивным процессом химического выветривания пирита (реакция раствора в слое 0-10 см падает до кислой).

При селективном формировании антропогенного стратиграфического разреза техноэкосистем, когда на поверхности оказываются благоприятные породы, на шестилетних отвалах формируется стадия сложный группировки и замкнутого фитоценоза, а биологическая продуктивность надземной массы составляет от (12,7-19,5) до (14,6-24,5) ц/га.

В.И. Вернадский [1] и его последователи выдвинули ряд положений и принципов, которые дополняют закон биогенной миграции атомов и определяют развитие современного биогенеза в техноэкосистемах.

1. «Живое вещество», «плёнка жизни», «сгусток жизни», «биогеоценотическая оболочка» [1] в процессах биогенеза, особенно биохимических реакциях,

может разделять изотопы на отдельные элементы и избирательно концентрировать их в разных количествах.

Анализ данных содержания 42 органогенных элемента, которое составляют «45,65 % общего числа периодической системы в геохимии В.И. Вернадского» [1], а также современная физико-биохимическая концепция минерального питания и депонирование живой материей химических элементов носит общий принципиальный характер: С, О, Н, N составляют 95-99 % массы растений, 96 % массы тела человека. В золе растений обнаружено 78 элементов из 108 известных сегодня.

2. Важная функция живого вещества тесно связана с окислительно-восстановительными реакциями.

От окислительно-восстановительного потенциала в «плёнке жизни» [1] зависит группировка электронов, ионный потенциал химических элементов, имеющих переменную валентность, а также миграция атомов и молекул. Потенциало-определяющими веществами техноэкосистемы есть  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  микробиологические метаболиты.

3. Количество химических элементов поглощённых и выделенных за период вегетации во много (десятки) раз превышает их содержание в растениях, причём значительную долю составляет химически изменившиеся (по сравнению с поглощёнными) формы соединений. Наибольшую долю в круговороте химических элементов в системе почва – растение составляет корневой круговорот [18].

4. Наряду с поглощением биотой элементов питания происходит активное выделение веществ корнями, надземными частями и корнеплодом. Транспирация по существу составляет интенсивный круговорот кислорода и водорода.

5. Нам представляется, что биогенный круговорот в литоземах на грани эдафотоп – корень включает (количественно практически не изучен, но имеет место): активный метаболизм клеток в зоне корневого чехлика, активное взаимодействие микроорганизмов и микоризы в муцигеле корневых волосков, селективную и экскреторную способность корней, мобилизацию потенциальных запасов химических элементов в породах и их последующую концентрацию за формую развернутого вершиной вглубь эдафотопа треугольника или буквы «Т».

**Закон внутреннего динамического равновесия Н.Ф. Реймерса.** В 1975 году Н.Ф. Реймерсом был [19] сформулирован закон внутреннего динамического равновесия и четыре важных для практики следствия: вещество, энергия, информация и динамические количества отдельных природных систем (в том числе экосистем) изменение одного из этих показателей вызывает сопутствующие функционально – структурные количественные и качественные перемены, сохраняющие общую сумму вещественно-энергетических, информационных и динамических качеств систем, где эти изменения происходят, или в их иерархии.

При селективном формировании техноэкосистем отдельно снимается плодородный слой почвы, а вскрытые породы отсыпаются в отвалы в последовательности их стратиграфического залегания.

Для зоны Степи Украины, где сформировались чернозем обыкновенный и чернозем южный, мощность  $H + Hpk + P(h)k$  составляет (85-95) см и  $H + Hp(i) + P(h)k$

– (55-70) см соответственно. Снятие гумусовых горизонтов зональной почвы, формирование временных буртов и последующие нанесения плодородного слоя почвы мощностью (50-80) см при создании техноземов, обуславливает перемешивание почвенной массы генетических горизонтов зональной почвы, изменение свойств и экологических режимов рекультивированных земель.

Энергия, вещество и информация техноземов действует не в зональном виде, а видоизменяются и селектируются этой антропогенной системой.

Развивая учения В.И. Вернадского, В.А. Ковда [20] предложил называть гумусный слой почв планеты гумусосферой, которая аккумулирует энергию и определяет стойкость биосфера. Для энергетических расчётов можно использовать среднее содержание энергии в гумусе  $20,9 \cdot 10^9$  Дж/т сухого вещества. Средние взвешенные запасы гумуса в гумусированном профиле почв Днепропетровской области составляет 330 т/га, а запас внутренней энергии гумуса –  $18,15 \cdot 10^8$  ккал/га. При создании техноземов с насыпным плодородным слоем почвы чернозема обыкновенного толщиной (50-80) см, количество гумуса может изменяться от 236 до 378 т/га. В пахотном слое рекультивированных земель его содержание уменьшается на (15-18) %. Отметим и тот факт, что органическое вещество плодородного слоя почвы за качественными показателями, уступает соотношению  $C_{гк}:C_{фк}$  в гумусовом горизонте (Н) чернозёма обыкновенного.

Плодородный слой почвы техноземов вскипает с поверхности за счёт содержания в нём нижней части первого переходного Нрк горизонта чернозема обыкновенного. Наличие кальциевых соединений в пахотном слое техноземов требует особого подхода к внесению фосфорных удобрений на рекультивированных землях. Подвижность антропогенных фосфатов в техноземах уменьшается за счёт быстрого образования трикальций фосфатов  $Ca_3(PO_4)_2$ ,  $FePO_4$ ,  $AlPO_4$ .

**Закон максимизации энергии (Г. и Э. Одумы) и информации.** В нарушенных ландшафтах локальные, региональные, глобальные круговороты веществ, энергии и информации незамкнуты взаимосвязаны как в рамках техноэкосистемы так и в рамках иерархии экосистем. Комплекс техногенных образований – вскрышные породы различного генезиса и состава, конечные траншеи, шламо- и хвостохранилища, рекультивированные участки требует анализа иерархий внутренних составляющих техноэкосистемы, в которой многолики и множественные направления потоков вещества и энергии.

Исследования естественных фитоценозов на вскрышных горных породах [10] позволили установить, что интенсивное преобразование за 4-6 лет абиотического субстрата в техноэкосистемах в биокосное вещество, по В.И. Вернадскому, происходит при наличии биоты.

На стадии пионерной группировки (двуухлетние отвалы) на лессовидных суглинках выявлено 38 видов растений, красно – бурых глинах – 18, серо – зелёных глинах – 9 и черных сланцевых глинах – 0. Экологический объем трофности пород сужается, и как следствие, «уменьшается его видовая емкость» [10]. Это ещё одна иллюстрация того, что в техноэкосистемах, сложенных различными вскрышными породами, экобиосистемные, а с течением времени биоценотические ряды отличаются по видовому составу, скорости и характеру формирования фитоценозов.

Сравнение по таким геоботаническим показателям нескольких пионерных фитоценозов, а также количество вещества и энергии, накоплённой в продукции, тесно связано с постулатами закона максимума энергии и информации: наилучшими шансами на самосохранение обладает система, в наибольшей степени способствующая поступлению, выработке и эффективному использованию энергии и информации.

Агроценоз эспарцета песчаного в фитомелиоративный период биологической рекультивации литоземов (серо-зелёная и красно-бурая глина), на 3-4 год жизни во всех видах производимой этим биоценозом продукции (сено, пожнивные и корневые остатки, биологически фиксированный азот, мёд) было сосредоточено  $3,03 \cdot 10^6$  ккал энергии [10].

В наших исследованиях после 7-летнего фитомелиоративного бобового агроценоза содержание гумуса в слое (0-20) см увеличилось с (0,1-0,3) % до (0,7-1,1) % на лессовидных суглинках и с (0,1-0,2) до (0,6-1,0) % на красно-буровой глине. Энергия, которая поступает в эдафотоп только с корнями люцерны и эспарцета за этот период, составляет на уровне  $(10,4-44,8) \cdot 10^6$  ккал/га.

Преобразование абиотического субстрата (не токсичные вскрышные породы) в биотоп подтверждается огромным фитомелиоративным эффектом бобовых агроценозов на литоземах. Прибавка урожая озимой пшеницы в звене люцернового фитомелиоративного севооборота (4-7 лет люцерна – черный пар – озимая пшеница) на лессовидном суглинке составила (30,4-39,4) ц/га (при урожайности на породах без посева бобовых трав на уровне (3,5-8,4) ц/га). Энергетический эффект прибавки урожая озимой пшеницы от фитомелиорации оценивается на уровне  $(1,05-1,21) \cdot 10^5$  ккал/га.

В биосферной жизни техноэкосистем действуют общие термодинамические законы и принципы. Наиболее очевидны и приближены к энергетико-экологичным нуждам техногенных ландшафтов: закон сохранения энергии (первый принцип термодинамики), второй закон термодинамики, закон минимума диссипации (рассеивания) энергии Л. Онзагера, закон односторонности потока энергии и другие, которые описаны в разделах этой работы.

**Закон минимума Ю. Либиха.** Немецкий исследователь Ю. Либих в водной культуре изучал относительное влияние питательных веществ на продуктивность растений. В 1840 году им был сформирован закон следующим образом: «рост растений зависит от того элемента питания который присутствует в минимальном количестве». Ю. Либих изображал бочку с дырами, показывая, что «нижний» уровень экологического фактора определяется уровнем жидкости, вытекающей из нее.

В дальнейшем, с развитием естествознания, этот закон получил примерно одинаковое толкование И.И. Дедю, В.П. Нарцисова, Н.Ф. Реймерса, К.М. Ситника и других учёных. Закон минимума может трактоваться и для живой природы – жизненные возможности лимитируются экологическими факторами, количество и качество которых близко к необходимому организму минимуму, отмечает Н.Ф. Реймерс [19].

В рекультивированных техноэкосистемах литоземы, в отличие от трофности зональных чернозёмов, имеют одновременно значительную совокупность лимитирующих экологических факторов: следы органического вещества и азота, неводопрочная или очень водопрочная агрономически не ценная структура, большие, чем равновесные показатели, значения плотности в слое (0-100) см эдафотопа, неудовлетворительное содержание и соотношение органических и минеральных соединений фосфора, его фракционный состав, микробно – биологические показатели пахотного слоя отсутствуют в первое время или имеют ничтожно малые значения.

Огромный научный материал по рекультивации земель, широко вошедшие в экологию законы, правила и принципы развития биосферы, показали, что для успешного применения на практике концепции Ю. Либиха, необходимо учитывать принципы отношений «система – среда» и «организм – среда».

Самые общие закономерности взаимосвязи техноэкосистема – среда обобщены в принципе Ле Шателье-Брауна: при внешнем воздействии, выводящем систему из состояния устойчивого равновесия, равновесие смещается в том направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется.

Техноэкосистемы и рекультивированные земли (техноземы, литоземы и хемоземы), как экологическая среда для обитания биоты, будут развиваться с учётом закономерности единства организмов и их среды обитания. Попадая на дневную поверхность (совершенно иное гидротермическое состояния, давление, свет), а также подвергаясь первичному воздействию микроорганизмов, а с течением времени, пионерной растительности или фитомелиорации, изменяется биологическая основа абиотической среды. Это обобщение, в классической форме сформировал В.И. Вернадский, и получило название закона единства организма – среда: «жизнь развивается в результате постоянного обмена вещества и информации на базе потока энергии в совокупном единстве среды и населяющих её организмов. А поскольку отношения организма и его среды системны, действует принцип экологического соответствия: форма существования организма всегда соответствует условиям его жизни [19].»

С учетом этих закономерностей, а также многолетних исследований на рекультивированных литоземах установлено, что вскрышные горные породы в техноэкосистемах по отношению к микроорганизмам, различным видам растений, характеризуются неодинаковым плодородием. Трофность литоземов, с учётом одновременной совокупности лимитирующих факторов (закон минимума Ю. Либиха), будет определяться правилом соответствия условий среды жизни генетической предопределенности организма. Плодородие вскрышных пород, динамика совокупности элементов и факторов трофности, находящихся в минимуме, будет определяться не агрохимическими показателями субстрата, а способностью биоты использовать предоставленную им экологическую среду обитания.

По нашему мнению, закон минимума Ю. Либиха строго применим только в условиях стационарного состояния проведения опыта (относится к одному отдельно взятому элементу/фактору), когда все другие факторы есть в достаточном количестве для роста и развития растений. Лимитирующий фактор – фактор, сила

проявления которого ниже или выше оптимума, ограничивающий развитие, размножение и рост численности особей [10].

В техноэкосистемах совокупность лимитирующих факторов воздействует сильнее всего на те фазы развития организмов, которые имеют «наименьшую экологическую валентность» [19] – температура, вода, реакция почвенного раствора, засоление, токсические химические продукты выветривания (например, образование серной кислоты при окислении пирита) и находятся в зоне пессимума (угнетения).

Со времен Ю. Либиха до наших дней общие закономерности системы среда – организм расширены от «механистических дыр» лимитирующего фактора до философских и экологических закономерностей развития слагающих компонентов биосферы.

В наибольшем общем виде эти закономерности развития техноэкосистем формируют закон ограничивающих (лимитирующих) факторов Ф. Блекмана, закон толерантности В. Шелфорда, закон максимума биогенной энергии (энтропии) В.И. Вернадского – Э.С. Бауэра, закон компенсации факторов Э.Рюбеля, правило замещения экологических условий В.В. Алехина и др. [19].

Н.Т. Масюк [10] расширяя и углубляя представление об организующей роли живого вещества в преобразовании техноэкосистем (сингенетические сукцессии микроценозов и фитоценозов при естественном зарастании, а затем, совместно с коллективом проблемной лаборатории по рекультивации земель, экологобиологическое обоснование этапов рекультивации [21]) разработал концепцию плодородия биогеоценотической системы (ПБГЦС).

Плодородие биогеоценотической системы – это способность фитоценоза (агроценоза), сопутствующих ему и свободно живущих микробо- и зооценозов использовать и преобразовывать предоставленную экологическую среду, или в более широкий и общей постановке – способность живого вещества осваивать и изменять среду своего обитания. ПБГЦС может быть охарактеризовано экотопическим объемом и его биотической емкостью [10].

Закон минимума Ю. Либиха, концепция плодородия биогеоценотической системы Н.Т. Масюка важны при экологическом прогнозировании развития техноэкосистем, планировании и экспертизе проектов по рекультивации нарушенных земель.

**Закономерности эволюции биосферы (по Н.Ф. Реймерсу) и современный процесс почвообразования на литоземах как устойчивое развитие агросистем в техногенных ландшафтах.** Н.В. Реймерс [19] изложил закономерности эволюции биосферы на основе обобщения теории, законов, правил и принципов экологии в рамках иерархии природных систем.

Современный социально – экологический процесс развития биосферы, согласно В.И. Вернадскому, направлен «в ноосферу, т.е. в сферу, где разум человека будет играть доминирующую роль в развитии системы человек – природа [1]. Основные классические слагаемые концентрации ноосферы: организующая роль живого вещества в преобразовании всей «пленки жизни» [1]; огромная ответ-

ственность современного человечества, которое... «всей своей жизнью стало единым целым» [1], за перестройку биосфера; управление геосистемными процес-сами устойчивого развития «ноосферы» [1] – «социосферы» [9] – «ноосферогене-за» [8] на основе Коллективного Разума за М.М. Моисеевым [6].

В.В. Докучаев [7] сформулировал «понятие о почве как самостоятельном природно-историческом теле», которое у В.И. Вернадского [1], А.Е. Ферсмана [4] на основе биогенеза, приобрело биокосное значение, а факторы почвообразова-ния принимают участие в формировании эдафотопа вещественно – энергетиче-скими показателями.

Антropогенные материнские породы различного генезиса и свойств, в тече-ние современного эволюционного времени почвообразования на них, развиваются в системе: субстрат (литозем) – живые организмы – природные воды – атмо-сфера. Это открытая термодинамическая система, имеющая вход и выход по энер-гии и веществу, значительно отличающийся от геохимической эволюции до начала голоценового периода и почвообразования.

Авторами [10, 16, 21] на протяжении короткого исторического времени (с 1962-1963 г.г.), установлены закономерности ускорения реальных эволюционных процессов и их направленности (микробиоценозы – пионерные сингенетические сукцессии микроценозов – фитоценоз – агроценоз – агроэкосистема) в техноген-ных ландшафтах (техноэкосистемах), а также установлены основные маркеры со-временного почвообразования на литоземах.

О.Е. Ферсман [4] утверждал, что «... основной процесс, который определяет фон геохимии гипергенных образований» на поверхности литосферы, это соотно-шение ее с кислородом. В.И. Вернадский [1] назвал свободный кислород самым могущественным химическим деятелем на Земле. Л. Пастер открыл так называе-мые облигатные анаэробы, которые не переносят кислород в концентрации, пре-вышающие примерно один процент (1 % точка Л. Пастера).

Свободный кислород является продуктом жизнедеятельности биоты, а в ис-торическом развитии Земли, прошел «вторую точку Пастера» (10 % кислорода). В современной атмосфере содержится 21 % кислорода от ее массы (второй химиче-ский элемент после азота).

Факт ускоренного развития геохимии гипергенных процессов в техноэкоси-стемах, наглядно подтверждается самовозгоранием пиритсодержащих террико-нов.

При окислении одного моля глюкозы до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  выделяется 2880 кДж энергии. Растения могут аккумулировать 40,37 % энергии при аэробном разложе-нии глюкозы, остальная рассеивается в виде тепла. Эффективность парового двига-теля составляет 8-12 %, бензинового 25-30 % [22].

Типичными окислителями, наряду с фтором, кислородом, хлором и другими элементами VI и VII групп периодической системы Д.И. Менделеева, являются сложные анионы, в которых более электроположительный элемент имеет высшую или значительную степень окисления, например  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{MnO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и другие.

Окислительно-восстановительные реакции постоянно происходят в литоземах и сопровождаются изменением реакции среды искусственного эдафотопа во время: в течении суток, календарного периода, вегетационного периода [23].

Абиотическим процессом в техноэкосистемах есть гидролиз карбонатных вскрышных пород, например:  $CaCO_3 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2$ .

Подщелачивание среды за условиями этой реакции, даже при непромывном типе водного режима Приднепровского региона, создаёт условия для вымывания гидрокарбоната кальция в более глубокие слои техногенных литоземов.

При создании литоземов необходимо учитывать, что верхняя часть лессовидных суглинков до глубины 2-3 м практически незасолена. В красно-бурых суглинках и красно-буруй глине сухой остаток увеличивается с глубиной залегания пород от 0,67 до 3,59 %. В числе водорастворимых солей преобладают сульфаты кальция. Величина сухого остатка в водной вытяжке серо-зелёных глин составляет 0,25-0,52 %.

Дифференциация по содержанию солей в слоях литоземов может осуществляться нисходящими (при условии достижения показателя влажности субстратов в верхнем слое НВ) и восходящими токами растворов (интенсивное испарение влаги до В3).

В литоземах могут складываться весьма благоприятные условия для обратных реакций, например:  $Na_2CO_3 + CaSO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + CaCO_3$ .

В антропогенных техноэкосистемах, при практически малоинтенсивном физическом выветривании (вскрышные породы прошли его в период голоцену и плейстоцену), на границе с атмосферой проходит и интенсивно развивающееся биологическое выветривание под действием микроорганизмов и растений – пионеров.

Н.Ф. Реймерс [19] отмечает, что помимо общебиосферного закона физико-химического единства живого вещества, в биосфере наблюдается системный мутуализм (законы экодинамики). В блок правил мутуалистического системного порядка в биосфере входят принципы (законы) упорядочености заполнения пространства и пространственно временной определённости, а также принцип системной дополнительности. Техноэкосистемы, как антропогенные «случайности» в биосфере, с течением времени подвергаются биотическому заселению и прежде всего микроорганизмами. Продуктами жизнедеятельности микроорганизмов есть выделение  $CO_2$  и образование органических и неорганических кислот. Следует отметить, что от динамичного количества  $CO_2$ , выделяемого организмами, величина pH в растворе субстрата находится в прямой зависимости.

В присутствии углекислого газа усиливается гидролиз – «более далёкие пути миграции растворов, выносящие вещества из одного геохимического комплекса свиты в другой» [4], например:



Пионерные, многолетние исследования сложной микробоценотической системы литоземов, проведенные И.Х. Узбеком [16] показали, что «инфицирование», «инкубация» вскрышных пород современным микропродуктом биосфера

осуществляется уже в период вскрышных горных работ, а в последующем при горно-техническом этапе рекультивации.

Инфицирование антропогенных материнских пород в техноэкосистемах за счёт окружающих миграционных структур за данными [16] составляет в среднем за вегетационный период на уровне  $9,47 \cdot 10^3$  шт/час/ $m^2$  спор и клеток микробов.

С учётом принципов экологической дополнительности, совместимости и связи экотоп – биоценоз, а также педоцентрического подхода биогеохимической оценки техногенных эдафотопов, в рекультивированных литоземах складывается свой биогеохимический поток вещества и энергии.

В фитомелиоративных севооборотах на литоземах с посевом бобовых автотрофов – продуцентов (люцерна синегибридная, эспарцет песчаный) накопление вещества и энергии значительно интенсифицируется, а депонирование части биогенных веществ в верхнем слое эдафотопа, определяется не только количественными показателями массы корней и корневых выделений, а подчиняется закону глобального замыкания биогеохимического круговорота веществ, закону биогенной миграции атомов. Учитывая отмеченную В.И. Вернадским [1] «чрезвычайную всюдность» автотрофных микроорганизмов и то обстоятельство, что «геохимическая энергия бактерий гораздо выше той же энергии зеленых растений» гетеротрофы – редуценты имеют очень высокую средообразующую роль на вскрышных горных породах. Микроорганизмы, участвуя в минерализации органического вещества корневой системы многолетних бобовых трав, завершают круговорот химических элементов в системе порода – растения, а минерализованные их формы вновь могут быть поглощены растениями.

С учетом закона исторического развития биологических систем Э. Бауэра, закона гомологических рядов и изменчивости Н.И. Вавилова многолетние бобовые травы следует рассматривать как филогенетически более древние, чем мятликовые (злаковые) культуры в эволюции растений. В этом, возможно, отражается общая тенденция увеличенной биогеохимической активности люцерны посевной и эспарцета песчаного при их возделывании на рекультивированных землях, сложенных вскрышными горными породами. Даже при естественном зарастании отвалов в техноэкосистемах [10] семейство бобовых было представлено люцерной хмелевидной хотя и в меньшем количестве (7,8 %), но ее продуктивность оказалась максимальной от общей массы на  $1\ m^2$ .

По данным Е.А. Бойченко [24] эволюционные переходы от гетерофности к фотосинтезу и симбиозу, от окисления в брожениях к дыханию в тысячи раз возросла деятельность растений в миграции многих атомов в биосфере.

Современный процесс почвообразования в техноэкосистемах базируется на законе биогенной миграции атомов. Степень замкнутости глобальных биогеохимических круговоротов основных биогенных элементов описана в работах В.И. Вернадского [1], О.Е. Ферсмана [4], В.А. Ковды [20].

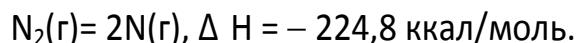
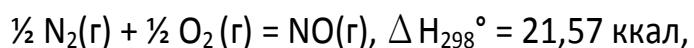
Остановимся на двух химических элементах – азот и углерод, количественный состав которых в атмосфере крайне неодинаковый ( $N_2$  – 79 %,  $CO_2$  – 0,028–0,029 %), а их участие в биогеохимическом круговороте и почвообразовании на литоземах является определяющим.

Азот – элемент жизни и плодородия, является «самым могущественным двигателем в процессах развития, роста и творчества природы» [25], но в переводе с греческого – непригодный для жизни. В тоже время протеин – первый.

Азот, как и углерод, водород, кислород, входит в альфа группу макробиогенных элементов. Зарождение почвообразовательного процесса и устойчивое развитие техноэкосистем будет определяться энергетикой биохимических этапов круговорота азота, а также продолжительностью фитомелиоративного (биологического) этапа рекультивации.

Тепловые эффекты биохимических реакций колеблются в широких пределах (образования веществ величины порядка (10-100) ккал/моль, сгорания – обычно превышают 100 ккал).

Термохимические уравнения реакций с участием азота подтверждают изложенное:



Рекультивированные литоземы в современной биосфере подвержены быстрой смене термодинамических условий и действию образующихся природных растворов у вскрышных пород, которые являются исключительно сложными физико – химическими системами.

Осадки, сформировавшиеся в атмосфере, относятся к маломинерализованным и имеют значительную динамику химического состава. Г.А. Булаткин [26] отмечает пределы колебаний в осадках  $\text{NO}_3^-$  от 0 до 1,68 мг/л (средние показатели 0,17). В среднем 1  $\text{km}^2$  земной поверхности получает с атмосферными осадками в течение года около одной тонны фиксированного азота. В осадках может встречаться как нитратная, так и аммиачная форма азота.

В рекультивированных литоземах при образовании природных растворов с участием азота, а в фитомелиоративный период интенсивное поступление молекулярного  $\text{N}_2$  в клубеньковые бактерии, в которых с участием ферментативного комплекса нитрогеназа, катализируется АТФ – зависимая реакция восстановления атмосферного  $\text{N}_2$  до  $\text{NH}_4^+$ , на огромной границе корень – эдафотоп (1 г массы корней соответствует  $(62,6-129,0) \text{ см}^2$  площади их поверхности [16]) значительно изменяются свойства и природа эдафического раствора.

Биогеохимия азота в техноэкосистемах и на рекультивированных литоземах включает: пополнение антропогенных материнских пород с атмосферными осадками (незначительные масштабы); физико-химическую фиксацию атмосферного азота (симбиотически Rhizobium и несимбиотически фиксированный азот бобовыми и др.); аммонификацию ( $\text{N}$ -содержащие соединения разлагаются микроорганизмами до  $\text{NH}_3$  или в растворе ион аммонио  $\text{NH}_4^+$ ); нитрификацию (окисление  $\text{NH}_4^+$  до  $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ); денитрификацию ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ ); физико-химическую фиксацию (дефиксация  $\text{NH}_4^+$  глинистыми минералами; радиус ионов аммония сближается с глинистым минералом калием по О.Е. Ферсману [4]); смыв  $\text{N}$ -содержащих соединений из надземной части растений (процесс изучен мало, однако имеются основания считать, что он может протекать в значительных масштабах).

бах с учетом противоположного процесса – поглощение азота сельскохозяйственными культурами при внекорневой подкормке).

Энергетика несимбиотического и симбиотического процесса азотфиксации в техноэкосистемах довольно значительная. Аммонификация глицина протекает с энергетическим эффектом 176 ккал, окисление аммиака при нитрификации – 196, реакции денитрификации – (545-570) ккал. В промышленности (при производстве аммиака, азотной кислоты и минеральных удобрений) на фиксацию 1кг N<sub>2</sub> затрачивается около 6·10<sup>3</sup> ккал (давление (30-32) МПа и температуре около 500°C, катализатор нагревают до 750°C).

**Азотфикссирующий эффект прокариотов на рекультивированных литоземах.** Способность к азотфиксации прокариотов известна с конца XIX века. Симбиотический потенциал свободноживущих микроорганизмов и многолетних бобовых трав в фитомелиоративный период проявляется в полном объеме только на рекультивированных литоземах.

Свободноживущие несимбиотические азотфиксаторы в техногенных эдафотопах, в ризосфере, на поверхности корней активно используют и развиваются в мицигеле (органическая слизь) корневых волосков. По ориентировочным подсчетам С.А. Самцевича [27] корни озимой пшеницы за лето продуцируют в почву не менее 700 м<sup>3</sup>/га сложного органического слизистого вещества. Несимбиотические азотфиксаторы способны за вегетационный период аккумулировать (25-95) кг/га [28].

И.Х. Узбек [16] установил, что в бобовых аgroценозах на рекультивированных землях, сложенных лессовидными суглинками, красно бурой и серо-зеленой глиной количество накопленного олигонитрофилами биологического азота в среднем за год в слое (0-40) см составляет от 38,9 до 66,1 кг/га. Следовательно, за 4-7-летний фитомелиоративный период техногенные эдафотопы обогащаются биологическим азотом (155,6-462,7) кг/га, а в агросукцесии с «попеременно чередующихся посевов люцерны и эспарцета» [10] в течение 10 лет на красно-бурой и серо-зеленой глине – больше 600 кг/га.

Главная роль в обогащении литоземов биологически связанным азотом принадлежит симбиозу клубеньковых бактерий с многолетними бобовыми травами. По средним обобщенным литературным данным поступление биологического азота под посевом многолетних бобовых трав на зональных почвах составляет от 50 до 300 кг/га [18].

Многолетними исследования проблемной лаборатории по рекультивации земель [21] нами установлено, что люцерна посевная и эспарцет песчаный на вскрышных (не токсичных) горных породах в степной зоне Украине за 4-7 летнее хозяйственное использование трав обеспечивают суммарный урожай сена (135,3-308,8) ц/га и (103,4-164,6) ц/га (за 6 лет) соответственно. Содержание биологически фиксированного азота в надземной части многолетних бобовых трав составляет на уровне (206,8-329,2) кг/га у эспарцета песчаного и (270,6-617,6) кг/га у люцерны синегиридной.

Классическими, более 30 лет, исследованиями корневых систем многолетних бобовых трав на рекультивированных землях [16], установлено, что люцерна

посевная в метровом слое техногенных эдафотопов формирует (53,5-98,8) ц/га (лессовидные суглинки), (78,7-105,4) (красно-бурая глина) и 81,4 ц/га (серо-зелёная глина), эспарцет песчаный – (46,5-78,3) ц/га. Следует отметить, что раскопки корневых систем многолетних бобовых трав (2-3 год хозяйственного использования) на глубину 2 м показали, что люцерна и эспарцет могут накапливать 100-150 ц/га и более (206 ц/га).

С учетом ежегодного отмирания части корневой системы бобовых трав (в расчете принято 25 % от учетной массы) и среднего содержания азота в корнях люцерны и эспарцета на уровне 1,44 % биологический азот, который поступает в метровый слой эдафотопа с корневой системой, после 4-7 летнего возделывания составляет на уровне (133,9-415,8) кг/га.

В симбиотических системах *Medicago sativa Rhizobium meliloti* на одно растение третьего года жизни в слое (0-100) см формируется 24-128 шт. клубеньковых бактерий (средняя масса (0,05-0,32) г), *Onobrychis arenaria+Rhizobium simplex* – (28-131) шт. массой (0,18-0,6) г [16].

Проведенные нами расчеты (среднее количество клубеньков на 1 растении принимали 77 шт., средняя густота многолетних бобовых трав за 4 года – 5 млн/га; масса среднего количества клубеньков 0,3 г; коэффициент клубеньков к средним двум укосам зеленой массы бобовых 1:0,8 = 1,8, содержание сухого вещества в клубеньках 1 %, содержание азота в клубеньках – 2,56 %) показали, что клубеньковыми бактериями в техногенном эдафотопе глубиной 100 см вовлекается в биогенный круговорот до 2128 кг/га атмосферного азота.

Расчетная величина биологической фиксации азота в четырехлетнем фитомелиоративном севообороте (далеко не полная, нами только на 20 % увеличено расчетное количество азота за счет: неучтенных корневых волосков, количество которых составляет от 2 до 100 шт. на 1мм<sup>2</sup> поверхности [22]; измочаленных клубеньков при отмывке корней; прижизненных корневых выделений; количество клубеньков на одно растение безусловно динамичный показатель в онтогенезе потерь при уборке и отавы после ежегодного последнего укоса) многолетними бобовыми травами на вскрышных породах достигает (3149-4348) кг/га. Обогащение техногенного эдафотопа биогенным азотом в звене севооборота: многолетние бобовые травы 4-7 лет – пар, по нашему мнению, составляет на уровне (2400-3000) кг/га.

Чистый азотфикссирующий эффект прокариотов на рекультивированных землях можно проиллюстрировать прибавкой урожая озимой пшеницы, в звене севооборота 4-7 лет многолетние бобовые травы – пар – озимая пшеница которая составляет по нашим данным (30,4-39,4) ц/га (при пионерном посеве зерновой культуры на породах (3,5-8,4) ц/га). Н.Т. Масюк [10] отмечается, что «после двух фитомелиоративных стадий» урожайность зерновых колосовых культур на породах составила 27,3 ц/га, а в субстратах осталось количество «...жизненных ресурсов, которого хватило, чтобы в сумме за 9 лет последействия повысить урожай зерна озимой пшеницы и ярого ячменя на 73 ц/га».

Обобщение данных в научной литературе, а также наш опыт биологической рекультивации, дают основание полагать, что основные фонды биологического азота в литоземах необходимо формировать за счет симбиотической фиксации атмосферного  $N_2$  системой Fabaceae + Rhizobium. Фитомелиоративный эффект биологической рекультивации (обогащение эдафотопа азотом) нами впервые установлен расчетным путем в размере до 3000 кг/га (вероятно и более). Ежегодный круговорот азота, посредством 4-7 летнего возделывания бобовых трав на литоземах, достигает 1086 кг/га.

**Биологический круговорот углерода в агроэкосистемах на рекультивированных землях.** Углерод – удивительный биогенный элемент. В зоне исторических геохимических барьеров (залегания угля, нефти, сланцев и др.) он был изъят из круговорота (ныне от сжигания горючих ископаемых увеличивается количество  $CO$  и  $CO_2$  в воздухе), а в настоящее время автотроф ежегодно фиксируют, в пересчете на углерод,  $75 \cdot 10^9$  т и образовывают  $5 \cdot 10^{10}$  органических веществ, главным образом углеводов. Механизм, который связывает углерод и космическую энергию, по выражению В.А. Ковды [20], «поразительно эффективен».

В биогенном круговороте углерода участвуют только органические соединения (доля С в составе сухих веществ растений составляет 45 %) и двуокись углерода. Вся цель, невероятно сложных и быстрых химических процессов при фотосинтезе, осуществляется для того чтобы обеспечить экосистему энергией.

Процесс симбиотической азотфиксации, требует затрат огромного количества энергии. В свою очередь продукты азотфиксации влияют на процесс фотосинтеза. На 1 г фиксированного азота бобовые растения используют 12 г органического углерода [22].

Нам впервые представляется, что современный биогенный поток углерода за фитомелиоративный период на литоземах, с его учетом затрат на азотфиксацию, составляет на уровне  $(3,7-5,2) \cdot 10^4$  кг/га. При соотношении у многолетних бобовых трав надземной массы к корням (1:2) в системе техногенный эдафотоп-растение в биогенный круговорот вовлекается  $(2,5-3,4) \cdot 10^4$  кг/га углерода. Исходя из этого количественного показателя мы можем утверждать, что биогенный углерод органических остатков в породах используется для зарождения фрагментов (ядерные, перефирийные) различных, сухо эдафических гумусовых веществ, которые образуются при микробиологическом разложении корней многолетних бобовых трав. Антропогенная динамика гумусообразования на литоземах составляет за фитомелиоративный период на уровне 0,1 % за год возделывания люцерны посевной или эспарцета песчаного.

**Биогеохимия и энергетика современного почвообразования на рекультивированных литоземах.** «Почвообразование это сложный антиэнтропный био-геофизико-химический процесс экзогенного превращения на поверхности Земли вещества и энергии...» [9].

В контексте системы парадигмы В.В. Докучаева «четвертого царства природы» [7], В.И. Вернадского «благородной пленки» [1] – почва есть функция факторов почвообразования во времени. Проблемная лаборатория по рекультивации земель ДГАУ с 1971 г. в стационарных условиях изучает современный почвообра-

зовательный процесс на вскрышных породах (лессовидные суглинки, краснобурая, серо-зеленая и черная сланцевая глины) и его антропогенную направленность (коррекция) с учетом агротехнических приемов в очень короткий исторический фактор времени.

В многолетних опытах на литоземах, заложенных в 1971 г. [21], продолжительных в 1975-2002 г.г. [27, 14] до настоящего времени, за 38 лет суммарная продуктивность учтенной надземной массы (сено люцерны посевной, эспарцета песчаного, гороха бобово-мятливой травосмеси) и зерна озимой пшеницы, ярого ячменя, кукурузы составила на серо – зеленой глине 990,5 ц/га.

Общая биопродуктивность антропогенной агроэкосистемы с учетом побочной продукции и корней за этот период равняется на уровне 198 т/га. На связывание 1 г углерода затрачивается 38 кДж энергии. Если принять в растительном веществе содержание углерода равное 45 %, то на рекультивированном эдафотопе энергетический эффект связанного углерода составляет на уровне  $3,4 \cdot 10^6$  мДж.

За период антропогенного сельскохозяйственного использования содержания органического вещества (молодого гумуса) в серо-зеленой глине увеличилось на 1,13 % и составило 1,31 % (при содержании в 1971 году – 0,18 % [21]).

Увеличение свежего органического вещества за фитомелиоративный период отмечено на всех породах. Органическая часть литоземов, сформированная в период биологического этапа рекультивации, это уникальная экосистема, состоящая из останков биоты, обладает важными, специфическими свойствами.

На основании анализа современного развития гипергенных процессов в антропогенных техногенесистемах, особенностей естественного зарастания отвалов, фитомелиорации на литоземах можно сделать вывод, что взаимодействие абиотических и биотических факторов обусловливает очень интенсивный естественный и особенно культурный почвообразовательный процесс.

Под интенсивностью почвообразования на антропогенных вскрышных породах мы подразумеваем скорость изменения концентрации основных биогенных элементов в литоземах за счет фитомелиорации и последующих звеньев агроэкосистем. За очень короткий исторический период (4-11 лет) в литоземах автотрофные прокариоты и микроорганизмы выполняют огромную средообразующую роль. Это позволило Н.Т. Масюку утверждать, что «субстраты горных пород ... преобразуются в эколого-мезотрофные (среднего плодородия) эдофотопы» [10].

После фитомелиоративного периода в литоземах формируется биогенность эдафотопа соответственно его физико-химических особенностей. Стабильность развития антропогенных техногенесистем будет определяться продуктивностью звеньев агрофитоценозов. Основными факторами коррекции продуктивности агроэкосистем на литоземах есть многолетние бобовые травы, удобрения и подбор культур, адаптированных к условиям техногенных ландшафтов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вернадский В.И. Биосфера. – Л.: Наука, 1967. – 216 с.
2. Розвиток сільських територій України. – К.: ІВЦ Держкомстату України, 2006. – 751 с.
3. Шемавнев В.И., Гордиенко Н.А., Дырда В.И., Забалуев В.А. Устойчивое развитие сложных экосистем. – Днепропетровск, 2005. – 355 с.

4. Ферсман А.Е. Геохимия. – Л.: Онти-химтеорет, 1934. – Т. 2. – 354 с.
5. Голубець М.А. Вступ до геосоціосистемології. – Львів, Паллі, 2005. – 199 с.
6. Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь разума. – М.: Изд-во МНЭПОУ, 1998. – 228 с.
7. Докучаев В.В. Русский чернозем. – М.-Л.: Огиз-сельхозгиз, 1936. – 529 с.
8. Перерва В.М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и ландшафты // Укр. гор. журн. – 2000. – №4. – С. 12-18.
9. Тихоненко Д.Г. і др. Грунтознавство. – К.: Вища школа, 2005. – 703 с.
10. Масюк Н.Т. Особенности формирования естественных и культурных фитоценозов на вскрышных горных породах в местах произведенной добычи полезных ископаемых // Рекультивация земель. – Днепропетровск, 1974. – С. 62-105.
11. Глинка К.Д. Новейшие течения в почвоведении // Почвоведение. – 1910. – № 1. – С. 25.
12. Милковская Л.Б. Повторим физику. – М: Высшая школа, 1972. – С. 457-485.
13. Концепція поліпшення екологічного становища гірничодобувних регіонів України // Постанова Кабінету міністрів України № 1606 від 31.08.1999.
14. Кобец А.С., Дырда В.И., Гордиенко Н.А., Демидов А.А. Устойчивое развитие сложных динамических систем. – Москва – Днепропетровск, 2008. – 314 с.
15. Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. – М., 1993. – 212 с.
16. Узбек I.Х. Еколо-біологічна оцінка едафотопів техногенних ландшафтів степової зони України: Автореф. дис. ... док. біолог. наук. – Дніпропетровськ, 2001. – 36 с.
17. Наплекова Н.Н., Сафонова Л.Г. Синтез аминокислот целлюлозоразрушающими микроорганизмами и их спутниками // Микробиология – народному хозяйству. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 122-131.
18. Снакин В.В. Анализ круговорота химических элементов в системе почва-растение // Почвенно-биогеоценологические исследования центральной Русской равнины. – М.: МГУ, 1980. – С. 112-196.
19. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). – М.: «Россия Молодая», 1994. – 367 с.
20. Ковда В.А. Основы учения о почвах: В 2 кн. – М., 1973.
21. Бекаревич Н.Е., Горобец Н.Д., Кабаненко В.П., Масюк Н.Т., Сидорович Л.П., Скороход Г.С., Узбек И.Х. Возделывание бобовых культур на опытных рекультивированных участках, заложенных на горных породах // Рекультивация земель. – Днепропетровск, 1974. – С. 139-167.
22. Макрушин М.М. і др. Фізіологія рослин. – Вінниця: Нова книга, 2006. – 416 с.
23. Снакин В.В., Волох П.В., Присяжная А.А. Особенности физико-химических режимов рекультивированных земель // Агрохимия. – 1984. – № 9. – С. 73-76.
24. Бойченко Е.А. Соединение металлов в эволюции растений в биосфере // Изд-во АН СССР. Сер. биол., 1976. – №3. – С. 236-240.
25. Тимирязев К.А. Жизнь растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 290 с.
26. Булаткин Г.А. Динамика pH атмосферных осадков на территории юного Подмосковья // Почвенно-биогеоценологические исследования центра русской равнины. – М., 1980. – С. 62-72.
27. Петренко С.Ф. Разработка фитомелиоративных севооборотов на лессовидных суглинках после разработок марганцевой руды // Эколо-биологические и социально-экономические основы с.-х. рекультивации в степной черноземной зоне УССР. Тр. ДСХИ. – Днепропетровск, 1984. – Т. 49. – С. 111-118.