

**Соботович Э.В., Долин В.В.**

*ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины»*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ БИОСФЕРЫ**

*В развитие идей В.И. Вернадского об эволюции биосферы в ноосферу определены ключевые проблемы ее современной промежуточной стадии – техносферы. Проиллюстрирована временная динамика природного и техногенного катастрофизма. Темпы техногенеза оценены по развитию ядерной энергетики. На примере искусственных радионуклидов рассмотрена интенсивность биогеохимических циклов вещества техногенного происхождения. Определены глобальные задачи экологической стабилизации биосферы.*

*Ноосфера – биосфера, переработанная научной мыслью, подготовлявшаяся шедшим сотни миллионов, может быть, миллиарды лет процессом, создавшим Homo Sapiens Faber, – не есть кратковременное и преходящее геологическое явление.*

*В.И.Вернадский*

Эта статья – одна из последних работ академика НАН Украины Э.В. Соботовича (1927—2013), основателя Института геохимии окружающей среды НАН Украины и первого в Украине со времен В.И. Вернадского научно-исследовательского отдела биогеохимии в структуре Института. Эмлен\* Владимирович развивал ряд научных направлений, основанных академиком В.И. Вернадским: радиохимию, геохимию и радиогеологию, космохимию и метеоритику, учение о живом веществе и биосфере. Именно учение о биосфере и живом веществе сконцентрировано через призму научной парадигмы В.И. Вернадского.

Эволюция биосферы является, пожалуй, ключевой проблемой, нашедшей отражение в большинстве работ В.И. Вернадского и трансформированной в его позднем творчестве в естественно-философское мировоззрение. Наблюдая современное глобальное преобразование окружающей среды, анализируя последствия антропогенной трансформации нашей планеты, в поиске путей преодоления противоречий между человеком и биосферой, мы все чаще обращаемся к трудам этого великого ученого – натуралиста и философа, где обнаруживаем гениальные предвидения происходящих сегодня процессов.

### **Биосфера, как геологическая оболочка Земли**

Исследуя происхождение термина «биосфера», В.И. Вернадский писал: «Понятие «биосферы», т.е. «области жизни», введено было в биологию Ламарком (1744—1829) в Париже в начале XIX в., а в геологию – Э. Зюссом (1831—1914) в Вене в конце того же века» [1]. Первоначально биосферами называли гипотетические глобулы (видимо под влиянием идей французских ученых XVIII века П.Л. Мопертюи и особенно Ж.Л. Бюффона о бессмертных органических молекулах), якобы составляющих живую основу всех организмов. Такое понимание продержалось во Франции до середины века [2]. И хотя в факсимильном издании “Hydrogéologie” [3] этот термин не встречается, Ж.-Б. Ламарком впервые сделана попытка естественнонаучного описания жизни в качестве планетарного явления, т.е. он вплотную подошел к современному пониманию биосферы.

Предтечей естественнонаучного подхода в описании биосферы по праву может счи-

---

\* Из первых букв фамилий Энгельс, Маркс, Ленин.

таться и А. Гумбольдт – один из крупнейших естествоиспытателей XIX века. И в своих ранних работах, и в позднем синтетическом произведении «Космос» он обобщил понимание того, что «...живое вещество есть неразрывная и закономерная часть поверхности планеты, неотделимая от ее химической среды» [4].

На последних страницах книги «Происхождение Альп» Э. Зюсс впервые представляет глобальное видение Земли, состоящей из взаимосвязанных оболочек, окружающих ядро и мантию: атмосферу, гидросферу, литосферу и биосферу. «Единственное, что выглядит чужеродным на этом большом построенном из сфер небесном теле – это, собственно говоря, органическая жизнь. Эта жизнь ограничивается одной определенной зоной – поверхностью литосферы. Растения, чьи корни в поисках питания проникают в почву и одновременно, дыша, устремляются в воздух, – великолепная иллюстрация местоположения жизни в области взаимодействия высших сфер и литосферы. И таким образом на поверхности земной тверди необходимо вычленить независимую Биосферу. Она простирается над сушей и изрезанной [гидросетью] поверхностью, но последовательность развития жабр и легких свидетельствует о том, что именно эта покрытая водой поверхность была первичной средой [обитания организмов]. Жабры на шее человеческого эмбриона – это одно из проявлений следов отдаленного времени, когда эта [покрытая водой] поверхность имела значительно большие размеры и жизнь еще не вышла на сушу. Возникновение и распространение органической жизни в высокой степени зависело от формирования поверхностного образа литосферы» [5] – перевод Н.Н. Григолинской. В дальнейшем он понимал под биосферой (синоним – Лик Земли) тонкую пленку жизни на земной поверхности: «совокупность организмов, ограниченную в пространстве и во времени и обитающую на поверхности Земли» [6].

Такой подход является наиболее распространенным, и вместе с тем наиболее односторонним. В нем биосфера представляется только как современная живая пленка (условно – оболочка) планеты, т.е. достаточно автономная совокупность всех организмов (животных, растений, бактерий), населяющих поверхность Земли и ее гидросферу и проникающих в той или иной мере в приповерхностные зоны атмосферы и литосферы. Такая биосфера сложным образом соотносится с другими геосферами Земли, что лишь усиливает иллюзию ее автономности. Биосфера Вернадского имеет неизмеримо большую глубину и характеризуется большим количеством основополагающих параметров. «Э. Зюсс (1831—1914) и геологи того времени могли смотреть и на проявление жизни и на Лик Земли, как на независимые друг от друга явления. Сейчас для нас ясно, что Лик Земли не является результатом «случайных явлений», а отвечает определенной резко ограниченной геологической земной оболочке – биосфере – одной из многих других, имеющих определенную структуру, характерную для земных планет» [7].

В «Очерках геохимии» В.И. Вернадский писал: «Живое вещество более или менее непрерывно распространено на земной поверхности, оно образует на ней тонкий, но сплошной покров, в котором концентрирована свободная химическая энергия, выработанная им из энергии Солнца. Этот слой есть земная оболочка, которую знаменитый австрийский геолог Э. Зюсс назвал биосферой и которая представляет одну из самых характерных черт организованности нашей планеты. Только в ней сосредоточена та особая форма нахождения химических элементов, которую мы называли живым веществом» [8].

Возможность абиогенетического формирования биосферы В.И. Вернадский связывал с периодом образования Луны из земного вещества. Основываясь на открытии дисимметрии органических молекул Л. Пастером и сформулированном П. Кюри принципе: «Дисимметрия может возникнуть только под влиянием причины, обладающей такой же дисимметрией», он предполагал, что такие условия могли возникнуть на поверхности нашей планеты, «если Луна образовалась из Земли» (по Дарвину). «Ибо отделение Луны было связано со спиральным – вихревым движением земного вещества (должно быть, правым), вторично не повторявшимся» [9]. Вероятно, это произошло на ранней догеологической стадии развития Земли, поскольку современные оценки ее возраста изотопными методами

находяться в межах 4,54—4,55 млрд лет [10], абсолютний вік Луни оцінюється в 4,53 млрд лет [11]. Давня дата дивергенції органічного речовини, заснована на знахідках біомаркерів, відповідає 3,97 млрд лет [12, 13]. Якщо слідувати теорії абіогенезу, то процес формування біосфери тривав більше півмільярда лет після виникнення умов дисиметрії.

При цьому В.І. Вернадський, не відкидаючи теорію Ч. Дарвіна, заснована на принципі Реді «Все живе походить від живого», приходив до космогенної теорії формування життя. «Признаючи біогенез, згідно науковому спостереженню, за єдину форму зародження живого, неминуче доводиться допустити, що початок життя в тому космосі, який ми спостерігаємо, не було, оскільки не було початку цього космосу\*. Життя вічне постольку, оскільки вічний космос, і передавалася завжди біогенезом. Те, що вірно для десятків і сотень мільйонів лет, протеклих від архейської ери до наших днів, вірно і для всього нескінченного ходу часу космічних періодів історії Землі. Вірно і для всієї Всесвітньої» [14].

В уявленні В.І. Вернадського «земна оболонка, біосфера, обіймає весь земний шар, має різко обособлені розміри; в значній мірі вона обумовлюється існуванням в ній живого речовини – їм *заселена*. Між її космою безжиттєвою частиною, її космічними природними тілами і живими речовинами, її населеними, іде неперервний матеріальний і енергетичний обмін, матеріально виражається в русі атомів, викликаному живим речовиною. Цей обмін в часі виражається закономірно змінюючись, неперервно прагнучи до стійкості *рівноваги*. Він пронизує всю біосферу, і цей *біогенний потік атомів* в значній мірі її створює. Так невіддільно і нерозривно біосфера на всьому протязі геологічного часу пов'язана з живим заселяючим її речовиною... *Живе речовина біосфери є сукупністю живих організмів, в ній живущих*» [15].

Структура біосфери характеризується суттєвою фізико-хімічною, геометричною і просторово-часовою різноманітністю. Вона складається з живого і космою речовини, розділених між собою «різкою непрохідною гранню». Маса живого речовини в біосфері лише складає кілька сотих частин відсотка. І одночасно вона є найбільш потужною геологічною силою біосфери, визначає циклічний біогенний потік атомів, в процесі якого виділяється велика вільна енергія. Процеси діяльності живого речовини відбуваються в *історичному* часі, перетворення неживої природи – в масштабі *геологічного* часу.

В сучасному розумінні біосфера – оболонка Землі, заселена живими організмами і змінювана ними. Вона розташована на перетині верхньої частини літосфери, нижньої частини атмосфери і займає майже всю гидросферу. Її верхня межа в атмосфері (15—20 км) визначається озоновим шаром, затримуючим короткохвильове ультрафіолетове випромінювання, шкідливе для живих організмів. Нижня межа в літосфері (3,5—7,5 км) визначається температурою переходу води в пар і температурою денатурації білків. Головна маса живих організмів суші мешкає в межах кількох метрів від поверхні землі. Межа біосфери в гидросфері (10—11 км) визначається дном Світового Океану, включаючи донні відкладення.

Біосфера населена великою кількістю живих організмів. В ній мешкає більше 3 000 000 видів рослин, тварин, грибів, бактерій і комах. Людина також є частиною біосфери. «Люди́нство, **як живе речовина**, нерозривно пов'язано з матеріально-енергетичними процесами певної геологічної оболонки землі – з **її біосферою**. Воно не може фізично бути від неї незалежним ні на одну хвилину» [16]. «Людина... не є випадковим, незалежним від оточуючого (біосфери або ноосфери) вільно діючим природним явищем. Він складає неминуче проявлення великого природного процесу, закономірно протікає в часі, по крайній мірі, двох мільярдів лет» [15].

\* Згідно сучасної теорії «Великого Вриву» вік Всесвітньої і часу, як фізичної величини, оцінюється приблизно в 13,8 млрд лет.

Эволюция биосферы неразрывно связана с эволюцией живого вещества. В ходе геологического времени возрастает степень его влияния (воздействия) на косное вещество биосферы. Одновременно в процессе биологической эволюции происходит изменение самих живых природных тел. Процесс биологической эволюции переносится в природные биокосные и биогенные тела, играющие основную роль в биосфере. «*Эволюция видов переходит в эволюцию биосферы*» [15]. При этом эволюционный процесс создает новую геологическую силу – «научную мысль социального человечества», – под влиянием которой в сочетании с человеческим трудом происходит эволюция биосферы в ноосферу. «Человеческий разум меняет ход природных процессов в такой же степени, как меняют их и другие известные нам проявления энергии...».

В.И. Вернадский собирался разработать учение о ноосфере более подробно, но не успел этого сделать. В статье «Несколько слов о ноосфере» и посмертно изданных монографиях содержатся условия, необходимые для перехода биосферы в ноосферу, которые выбраны из этих трудов и опубликованы Ф.Т. Яншиной [17, 18]:

- Заселение человеком всей планеты.
- Резкое преобразование средств связи и обмена между различными странами.
- Усиление связей, в том числе политических, между всеми государствами Земли.
- Преобладание геологической роли человека над другими геологическими процессами, протекающими в биосфере.
- Расширение границ биосферы и выход человека в космос.
- Освоение новых мощных источников энергии.
- Равенство людей всех стран и религий.
- Увеличение роли народных масс в решении вопросов внешней и внутренней политики.
- Свобода научной мысли и научного изыскания от давления религиозных, философских и политических построений и создание в общественном государственном слое условий, благоприятных для свободной научной мысли.
- Подъем благосостояния трудящихся. Создание реальной возможности не допустить недоедания, голода, нищеты и ослабить влияние болезней.
- Разумное преобразование природы Земли с целью сделать ее способной удовлетворить все материальные, эстетические и духовные потребности численно растущего человечества.
- Исключение войн из жизни общества.

К концу прошлого – началу нынешнего столетия, в основном, эти предпосылки были выполнены, либо находились в стадии активной реализации. В частности, «преобладание геологической роли человека над другими геологическими процессами, протекающими в биосфере», то есть, оправдывая прогнозы В.И. Вернадского, человек в настоящее время является главной геологической силой нашей планеты.

### **Техносфера – современное эволюционное состояние биосферы**

В.И. Вернадский не употреблял термины «техногенез» и «техносфера». Они появились уже после смерти ученого. Однако в своем творчестве он вплотную подошел к описанию тех процессов эволюции, которые мы наблюдаем сегодня. «Равновесие в миграции элементов, которое установилось в течение геологических времен, нарушается разумом и деятельностью человечества. Мы находимся в настоящее время в периоде изменения этим путем условий термодинамического равновесия внутри биосферы» [8].

Сопряжение «геометрического» (биологического) и «арифметического» (геохимического) подходов к описанию явлений жизни и эволюции видов положено В.И. Вернадским в основу нового научного направления – биогеохимии, на представлениях которого базируется теория эволюции биосферы. В течение геологического времени «в сложной организованности биосферы происходили в пределах живого вещества только перегруппировки химических элементов, а не коренные изменения их состава и количества – перегрупп-

пировки, не отражающиеся на постоянстве и неизменности геологических – в данном случае геохимических – процессов, в которых эти живые вещества принимали участие» [19]. К основным факторам биогенной миграции, связанным с веществом живого организма, ученый относил:

- генетические свойства живого организма,
- интенсивность биогенного тока атомов,
- технику жизни живых организмов,
- а также изменения в положении атомов вследствие внесения в биосферу новых соединений.

Последний по своему эффекту является наиболее мощным фактором биогенной миграции, который впоследствии был положен А.Е. Ферсманом в основу теории техногенеза [20].

Миллиарды лет развивающаяся биосфера в течение последних нескольких тысячелетий подвергалась процессу техногенеза, заключающемся в антропогенном преобразовании окружающей среды с целью создания материальных условий (благ) для развития цивилизации. Переход человека к скотоводству и земледелию вызвал изменение состава растительного покрова, а последующее развитие промышленности и, соответственно, энергетики – к образованию мощных техногенных потоков химических элементов в литосфере, гидросфере и атмосфере. Вся история человечества сопровождается концентрированием одних и рассеиванием других химических элементов в окружающей среде.

Основные потоки техногенных веществ возникают в результате хозяйственной деятельности человека. Отторжение естественных угодий ведет к формированию новых агробиогеоценозов, облик ландшафтов изменяется под влиянием горной и металлургической промышленности. Развитие промышленности приводит к возрастанию энергопотребления и необходимости наращивания энергетических мощностей, требует новых, все более мощных, источников энергии.

Зона техногенеза кратко характеризуется следующим образом [21]. Ее мощность достигает 7,5 км, что практически соответствует нижней границе биосферы в литосфере. Перемещение и переотложение относительно пустых пород в верхней части гидrolитосферы в 8,1 раза превышает интенсивность осадкоотложения в фанерозое – 2,3 млрд т×год<sup>-1</sup>. Поступление отходов промышленного и сельскохозяйственного производств, включая удобрения и пестициды, превосходит по массе осадконакопления в фанерозое в

3,2 раза [25]. Ежегодно на каждого человека планеты добывается около 20 т полезных ископаемых. Превышение техногенной эмиссии ряда элементов над природной составляет один-два порядка и более (табл. 1). Человек использует более 10 % общего речного стока и около 11 % территории суши [26]. В пределах землепользования существуют участки максимального скопления населения (крупные города), к которым, как правило, привязаны мощные промышленные и энергетические объекты.

**Таблица 1.** Глобальная эмиссия химических элементов (по данным [21, 22, 23, 24])

Элемент	Эмиссия, тыс. т×год <sup>-1</sup>		Соотношение, раз
	Природная	Техногенная	
Cd	0,1—3,9	5,6—37,7	9,7—56
Cr	4,5—83,0	30,5—1310,0	6,8—16
Cu	2,2—53,8	35,4—1403,0	16—26
Hg	0,16—4,9	1,6—15,0	3,1—10
Mn	51,5—582,0	516—2633	4,5—10
Ni	2,9—56,8	55,7—494,0	8,7—19
Pb	0,9—23,5	332—1039	44—369
Zn	4,0—86,0	132—1954	23—33
V	66,1—70,0	86—138	1,3—2,0
As	1,1—23,5	18,8—111,6	4,7—17
Se	0,4	3,8—76,5	9,5—191
F	2,8—8,8	6,8	2,4

Главной чертой минувшего столетия является развитие энергоемких технологий, что привело к бурному развитию энергетики. В результате антропогенеза был создан ряд веществ (искусственных изотопов и органических соединений), не существующих в природе либо не присущих геохимической среде. Антропогенный фактор привел к определенным изменениям биосферы, как

глобальным, например климатическим, так и локальным – появлению новых, либо мутации существующих биологических видов. Опыт минувших исследований показал, что поведение химических элементов техногенного происхождения в окружающей среде коренным образом отличается от их естественных аналогов, что привело к образованию техногенных аномалий [27].

К концу прошлого – началу нынешнего столетия прогнозы В.И. Вернадского оправдались: антропогенное преобразование биосферы по своей интенсивности сравнялось, а в некоторых случаях – превышает мощность естественных геологических процессов. Ученый не успел раскрыть до конца понятие ноосферы как сферы разума, но, вероятно, он полагал, что ноосфера – это не только область проникновения в суть природы через ее познание, и не только область деятельности человека во взаимодействии с природой, но и направленная также на ее сохранение. «...Тот химический процесс, который ведется... коллективной работой человечества, ...в немногие десятилетия или столетия... разрушает и переводит в новые соединения то, что скопилось в многомиллионной жизни земной коры». В связи с чем «приходится технический процесс направить в другое русло, изменить геохимическую работу человечества в зависимости от химии земной коры» [28]. Наверняка он полагал, что человечеству хватит разума бережно относиться к дому, в котором оно живет: «Научное знание, проявляющееся как геологическая сила, создающая ноосферу, не может приводить к результатам, противоречащим тому геологическому процессу, созданием которого она является» [15]. Мы же сегодня пожираем несущие конструкции своего дома ради необходимой нам жизненной энергии, и, в конечном итоге, продуцируем отходы. В процессе техногенеза сформировался ряд проблем [29]:

- Отравление воздуха, воды и почвы отходами промышленности и сельского хозяйства, отсюда недостаток чистой пресной воды, а, возможно, и кислорода воздуха, отсутствие экологически чистых территорий на Земле.

- Недостаток продуктов питания вследствие перенаселения планеты, истощения и эрозии почв.

- Истощение минеральных ресурсов и энергетический голод.

- Нарушение геологического, геохимического, биологического и климатического равновесий в природе.

- Тепловое загрязнение планеты.

Техногенез, движущей силой которого является антропогенный фактор, ведет к трансформации биосферы в техносферу. В процессе эволюции биосферы вследствие антропогенной деятельности наблюдается нарушение одного из основных геохимических принципов – о неизменности биосферы и геохимических циклов химических элементов, сформировавшихся в течение геологического времени. Таким образом, современный период антропогенной эволюции биосферы определяется интенсивным развитием техносферы, которая является промежуточной стадией между биосферой и ноосферой:

*Биосфера*  $\xrightarrow{\text{техногенез}}$  *Техносфера*  $\xrightarrow{\text{ноогенез}}$  *Ноосфера* .

Человечество не может существовать без невозполнимых изъятий из природы того, что дает ему энергию. Лозунг Мичурина: «Мы не должны ждать милостей от природы, взять их у нее – наша задача!» понимался слишком буквально. Нужна электроэнергия – построили Днепрогэс, а затем и целый каскад ГЭС на Днестре. Исчерпали Шебелинку «до дна», – уничтожаем черноземы ради угля, руды и т.д. Если развитие техногенеза будет продолжаться в соответствии с этим лозунгом, то человечество приговорено к уничтожению.

Научная общественность ясно осознала угрозу существования человечества около 40 лет тому назад: в 1970 г. Римский клуб выпустил книгу «Пределы роста». В последние годы уже не только ученые, но и политики забили тревогу по этому поводу.

Основные проблемы человечества – это энергия и отходы. В широком смысле отходы – это все, что является результатом нашей деятельности по производству энергии и ее

использованию. Даже если бы мы не имели проблем с производством энергии и производили бы ее в неограниченных количествах, то все равно производили бы отходы в виде теплового загрязнения Земли.

Газ и нефть будут полностью исчерпаны в текущем столетии, уголь – в следующем. При сохранении современной структуры ядерной энергетики запасов урана хватит на 100 лет. Ресурсы энергии больших рек практически исчерпаны, альтернативные источники энергии – солнечная и ветровая, – никогда не смогут скомпенсировать неизбежные потери современных энергетических ресурсов. Альтернативные виды топлива, производимого из рапса или других масличных культур, также не смогут стать заменой нефти и газа.

Уже сейчас значительная часть населения Земли испытывает недостаток в продуктах питания, часть – прямо голодает. Ежегодные потери ресурсов плодородных почв в мире составляет 16 млн га.

Обращение с отходами – это вторая мировая проблема после энергетической. В настоящее время только в Украине накоплено около 2,5 млрд т отходов [30]. Уменьшение объемов отходов сопровождается увеличением затрат энергии. Однако уменьшение объемов отходов не может быть беспредельным, сколько бы энергии мы на это не затрачивали. Стало быть, нужно стремиться пользоваться такими источниками энергии, отходы которых в наименьшей степени влияют на состояние биосферы.

Таким образом, переход от техногенеза к ноогенезу, прежде всего, определяется глобальным внедрением замкнутого безотходного производственного цикла, а также приведением уже накопленных отходов в состояние, которое вписывается в природные биогеохимические циклы.

Очевидно, назрела необходимость расширения подхода к биогеохимическим исследованиям, которые уже сегодня выходят далеко за пределы изучения влияния живого вещества на формирование химического состава земной коры, и развития нового направления научных исследований – *биогеохимии ноосферы*, изучающей взаимное влияние живого и неживого вещества на формирование химического и ценотического состава биосферы в условиях становления человека как главной геологической силы планеты.

Стратегическим заданием этого направления является определение критериев перехода количественных характеристик в качественные – отражение изменений химического состава зоны аэрации и присущих ей организмов, вызванных развитием техногенеза, – в ценотическом составе биогеоценоза. Глобальная задача современности – это определение пределов емкости биосферы к побочным продуктам техногенной деятельности, ее способности к самоочищению с учетом синергетических эффектов. В будущем – именно это будет определять жизнь Человечества на Земле.

### **Катастрофизм, как характерная черта техногенеза**

В работе «Научная мысль, как планетарное явление» В.И. Вернадский выдвинул гипотезу об активизации геологических процессов в процессе преобразования биосферы вследствие деятельности живого вещества: «Эволюция биосферы связана с *усилением эволюционного процесса* живого вещества».

В истории земной коры наблюдаются критические периоды, в которые геологическая деятельность в самых разнообразных ее проявлениях усиливается в своем темпе. Это усиление, конечно, незаметно в историческом времени и может быть научно отмечено только в масштабе времени геологического.

Можно считать эти периоды *критическими* в истории планеты, и все указывает, что они вызываются глубокими с точки зрения земной коры процессами, по всей видимости, выходящими за ее пределы. Одновременно наблюдается усиление вулканических, орогенетических, ледниковых явлений, трансгрессий моря и других геологических процессов, охватывающих большую часть биосферы одновременно на всем ее протяжении. Эволюционный процесс совпадает в своем усилении, в своих самых больших изменениях с этими периодами. В эти периоды создаются важнейшие и крупные изменения структуры живого

вещества, что является ярким выражением глубины геологического значения этого пластического отражения живого вещества на происходящие изменения планеты.

Пока это не сделано, мы должны отметить и учитывать, что *процесс эволюции биосферы, переход ее в ноосферу, явно проявляет ускорение темпа геологических процессов* (выделено авт.) Тех изменений, которые проявляются сейчас в биосфере в течение немногих тысяч лет в связи с ростом научной мысли и социальной деятельности человечества, не было в истории биосферы раньше» [15].

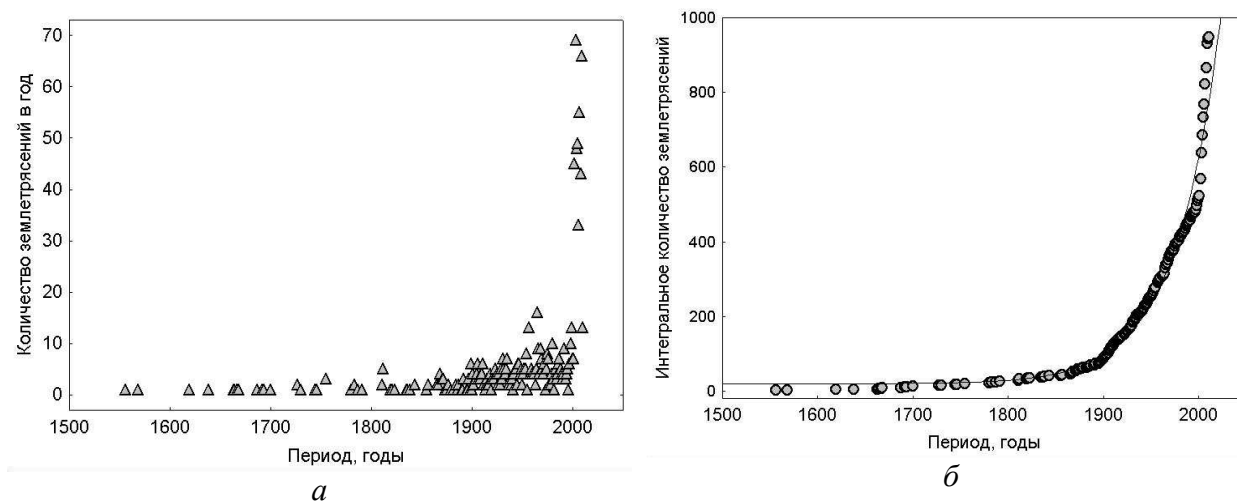
К сожалению, этот тезис не нашел развития ни в этой, ни в последующих работах ученого. Попробуем проиллюстрировать его, используя статистику землетрясений по материалам Геологической Службы США [31].

С середины XVI столетия (крупнейшее землетрясение в Китае в 1556 г. унесло 830 тысяч жертв) до нынешних дней произошло около 1000 землетрясений с магнитудой 6 и более баллов по шкале Рихтера. Известны и более ранние события, относящиеся к периоду до нашей эры, однако авторы решили ограничиться пятивековым периодом, в течение которого велась более или менее достоверная статистика сейсмических событий.

В последние два столетия наблюдается явная тенденция к ежегодному увеличению количества землетрясений, которая особенно остро проявляется на рубеже нынешнего тысячелетия. Лишь в период с января до октября 2011 г. произошло 55 землетрясений с магнитудой свыше 4,1 балла, а 2003 год отмечен рекордным количеством крупных сейсмических событий – 69 землетрясений с магнитудой 6 и более баллов (рис. 1,а).

Однако значительные флуктуации количества сейсмических событий не позволяют четко определить закономерности их проявления, поэтому предложено было использовать интегральный показатель общего количества крупных землетрясений (нарастающим итогом) (рис. 1,б). Каждая точка отвечает общему количеству землетрясений, произошедших в период с 1556 г. до года, соответствующего этой точке.

Экспоненциальная динамика интегрального показателя (см. рис. 1,б) является очевидным подтверждением тезиса В.И. Вернадского об активизации геологических процессов, связанной с «усилением эволюционного процесса живого вещества», особенно мощно проявляющегося в период техногенеза.

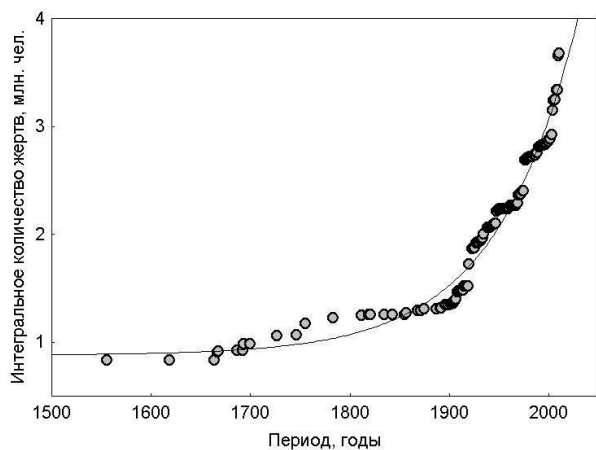


**Рис. 1.** Удельное (годовое) (а) и интегральное (нарастающим итогом) (б) количество крупных землетрясений с магнитудой 6 и более баллов по шкале Рихтера (построено с использованием базы данных Геологической службы США)

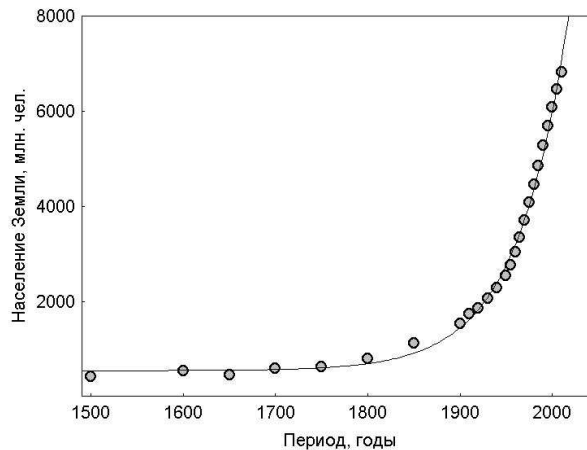
Не менее важным представляется анализ количества жертв вследствие землетрясений (рис. 2). Здесь также применен интегральный показатель: каждая точка характеризует общее количество жертв за период с 1556 г. до года, соответствующего этой точке. По темпам возрастания этот показатель соответствует увеличению населения Земного шара



(рис. 3)\*. Интересно отметить несколько скачкообразных периодов, наблюдаемых на этом графике (см. рис. 2). Первый – относится к середине XIX века и растянут почти на столетие, второй – с начала до середины XX века, третий – 1980-е—2000-е годы. Похоже, что сейчас мы находимся в середине четвертого такого периода. С продвижением по шкале времени скачкообразные периоды, характеризуемые интегральным показателем жертв землетрясений, становятся более короткими и стремительными.



**Рис. 2.** Интегральное (нарастающим итогом) количество жертв землетрясений (построено с использованием базы данных Геологической службы США)



**Рис. 3.** Динамика изменения населения Земного шара за 500 лет (построено с использованием данных справочника «Everyday» [32])

В последние несколько столетий наблюдается также активизация других природных катаклизмов: цунами, тайфуны, торнадо, аномальные температуры и пр. Эти природные явления усугубляются техногенным катастрофизмом.

Одним из наиболее статистически достоверных типов техногенного катастрофизма являются авиакатастрофы. Интегральные показатели количества авиакатастроф (рис. 4,а) и числа их жертв (рис. 4,б) также характеризуются экспоненциальной динамикой. С начала XX века интенсивно развивается самолетостроение, растут объемы пассажирских перевозок и экспоненциально возрастает как общее количество авиакатастроф, так и число погибших. Весьма оптимистично выглядит наблюдаемое в настоящее время выполаживание интегральных кривых, что свидетельствует о снижении темпов авиакатастрофизма и, вероятно, связано с техническими усовершенствованиями в области безопасности полетов.

### Оценка темпов техногенеза по развитию ядерной энергетики

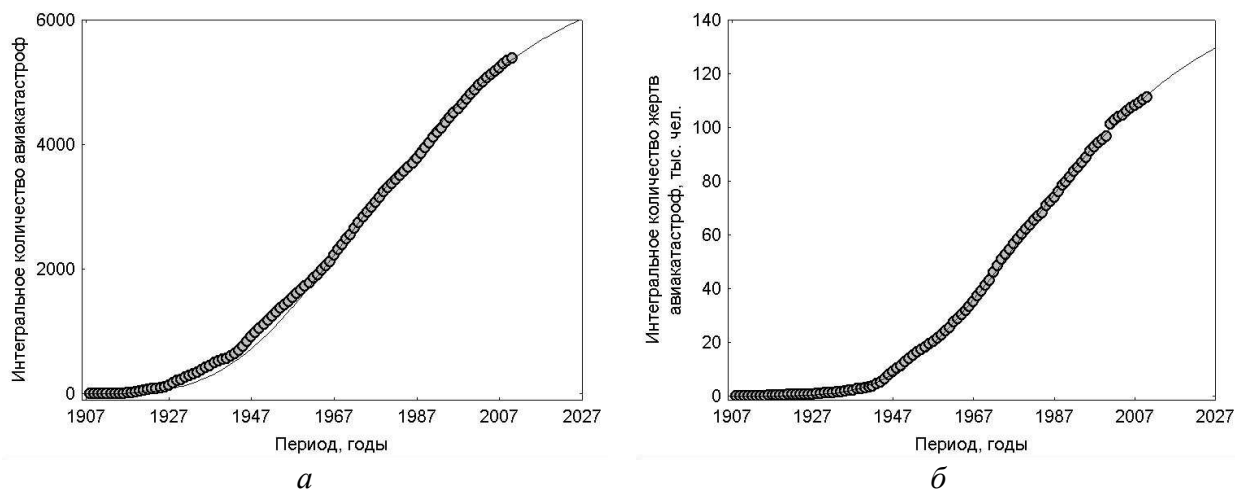
Одной из главных современных проблем человечества, как упоминалось выше, является энергетическая. Интенсивность техногенеза весьма представительно иллюстрируется развитием энергетической отрасли, а в последние 60 лет – наращиванием мощностей ядерной энергетики (рис. 5).

По данным Всемирной ядерной ассоциации [34] в начале 2011 г. в мире функционировало 441 ядерных энергоблоков общей мощностью  $371 \text{ ГВт(эл.)} \times \text{год}^{-1}$ , что составляет около 17 % мирового производства электроэнергии. Ведущее место по использованию ядерной энергии занимают Франция (75 %), Украина (48 %), Швеция (47 %), Южная Корея (43 %).

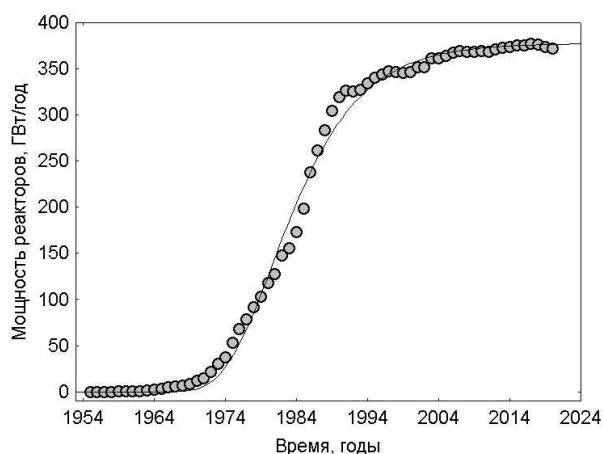
Экспоненциальное наращивание мощностей ядерной энергетики в 1970—2000 гг. существенно замедляется в начале третьего тысячелетия, что свидетельствует об истощении возможностей современных технологий для удовлетворения мировых потребностей в энергии (рис. 5). Наращивание мощностей за счет количества ядерных реакторов лимити-

\* Авторы не ставили задачей настоящей работы анализ параметров приведенных экспоненциальных кривых. Графики приводятся с целью иллюстрации идей В.И. Вернадского, которые ученый не успел развить в своих работах.

руется истощением запасов урана, социально-экологическими и экономическими факторами. Форма кривой вполне соответствует законам диалектики, современным представлениям о развитии общества и фактически представляет собой линейную развертку витка спирали развития [35].



**Рис. 4.** Динамика интегральных показателей количества авиакатастроф (а) и числа их жертв (б). Построено с использованием базы данных Plane Crash Info [33]



**Рис. 5.** Развитие ядерной энергетики мира (построено по данным Всемирной ядерной ассоциации)

ра, который планируется запустить в 2019 г.

Интересно отметить, что крупнейшие ядерные аварии в Три-Майл Айленд (1979) и Чернобыле (1986) с разрушением активной зоны не привели к изменению темпов развития ядерной энергетики. Это дает основания полагать, что и катастрофа в Фукусиме (2011) существенно не изменит положение дел. Все эти аварии развивались по одному сценарию: перегрев активной зоны – образование и взрыв водорода – неконтролируемая ядерная реакция – расплавление активной зоны (мелтдаун). И лишь конструкционные особенности аварийных реакторов определяли экологические последствия аварий.

Тем не менее, Чернобыльская катастрофа кардинальным образом изменила отношение к ядерной энергетике в целом. Под давлением общественности, а также в связи с конструктивными недостатками, в мире было законсервировано строительство 55 блоков общей мощностью около 50 ГВт, в том числе в США – 19, Украине – 10 (сюда относятся также 5 и 6 блоки ЧАЭС), России – 8. Австрия, Беларусь, Куба, Италия, Северная Корея, Польша, Филиппины отказались от размещения объектов ядерной энергетики на своей территории и законсервировали начатое строительство АЭС.

Если системно рассмотреть влияние на биосферу всех ныне известных источников

Выполживание кривой развития ядерной энергетики в начале третьего тысячелетия ведет к выводу о необходимости «технологического скачка» для дальнейшего развития ядерной отрасли в соответствии с возрастающей потребностью в энергии.

Возможно, такой «скачок» будет сделан с введением в эксплуатацию реакторов IV поколения. Но в этом случае изменяются, главным образом, конструкционные особенности, а процесс, даже основанный на ториевом топливе, остается тот же. Вполне вероятно, что таким скачком может стать реализация проекта ИТЕР – международного экспериментального термоядерного реакто-

енергии (имеются в виду те, которые обеспечивают получение необходимого количества энергии), то, как ни парадоксально это звучит после Чернобыля, наиболее приемлема – ядерная энергетика.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями ядерного топливного цикла сравнительно малы, и, главным образом, связаны с добычей и переработкой минерального сырья. На много порядков больше объемы выбросов химических загрязнителей в процессе штатной эксплуатации тепловых электростанций: оксидов углерода, азота, серы и других веществ, многие из которых являются канцерогенами. С этим связаны экологические проблемы как региональные – ухудшение здоровья населения урбанизированных территорий, так и глобальные – изменение климата в результате парникового эффекта.

Атомная отрасль, занимающая второе место по потреблению воды, по объему загрязнения гидросферы сбросами сточных вод – занимает одно из последних мест.

Масштабы техногенного нарушения земель в атомной отрасли в результате разработки месторождений и переработки урановых руд – на порядок меньше, чем в любой другой топливно-энергетической отрасли.

Воздействие предприятий ядерного топливного цикла на окружающую среду, как правило, отождествляют с радиационным воздействием, противопоставляя ядерную энергетику другим топливно-энергетическим отраслям. Однако, радиационное воздействие вообще свойственно многим сферам деятельности, а угольная энергетика, в частности, оказывает несравненно большее радиационное воздействие на окружающую среду, чем ядерная. Рассчитанный нами по данным [36] суммарный выброс нормируемых радионуклидов АЭС Украины составляет  $(1,45—10,3) \times 10^{10}$ , ТЭС –  $(1,5—8,0) \times 10^{11}$  Бк $\times$ год $^{-1}$ . Причем в выбросах ТЭС преобладают долгоживущие изотопы U-Th рядов.

Деятельность предприятий ядерной энергетики, как в Украине, так и в мире несравненно более строго регламентируется и контролируется, чем деятельность во всех других сферах (вероятно, только военная отрасль в этом отношении может сравниться с ядерно-энергетической).

История атомной энергетики в Украине начинается со строительства первого блока Чернобыльской АЭС с ядерным реактором РБМК-1000, который был сдан в эксплуатацию в сентябре 1977 г. В настоящее время на четырех действующих АЭС Украины эксплуатируется 15 блоков общей мощностью 13,8 ГВт (эл.) $\times$ год $^{-1}$ .

Энергетической стратегией Украины на период до 2030 г. [37] предусмотрено доведение мощности АЭС до 29,5 ГВт в результате строительства 10 новых и заменой 9 эксплуатируемых в настоящее время энергоблоков. При этом планируется строить ВВЭР того же (возможно несколько улучшенного) типа, что и ныне работающие. Предполагается создание собственного уранового топливного цикла и увеличение добычи урана. В Украине запасов  $^{235}\text{U}$  достаточно для внутреннего использования в течение не менее 100 лет. При использовании быстрых реакторов четвертого поколения запасов  $^{238}\text{U}$  может хватить на тысячелетия. При условии освоения ториевого цикла запасов тория в Украине (в несколько раз больше, чем урана) может хватить на многие тысячелетия. Ориентация на использование бесперспективных реакторов уходящего поколения не сулит привлекательного будущего ни ядерной энергетике, ни экономике Украины [38]. Динамика развития ядерной энергетики мира (см. рис. 5), представленной в преобладающем большинстве легководяными реакторами различных типов, свидетельствует, что такой путь развития ядерно-энергетической отрасли Украины является тупиковым.

При оценке возможных альтернатив ядерной энергетике во главу угла обычно ставят радиационное воздействие на живую природу и человека. При этом практически нет каких-либо аргументов, подтверждающих негативные последствия радиационного воздействия объектов ядерной энергетики на живое вещество, кроме последствий крупных аварий, таких, как авария на ЧАЭС 1986 года. Нисколько не умаляя трагических масштабов Чернобыльской катастрофы, проведем следующее сравнение. Вследствие облучения полностью погибло около 100 га лесонасаждений, тогда как на порядок больше ежегодно

гибнет вследствие лесных пожаров. Результаты эколого-геохимических и биогеохимических исследований свидетельствуют о полном восстановлении за 20—25 лет экосистем Чернобыльской зоны отчуждения, подвергнутых летальным и сублетальным уровням облучения. Ежегодно вследствие воздействия техногенных и неблагоприятных естественных факторов гибнет около 10 тыс. га лесных насаждений [30]. Только в Житомирской области около 15 тыс. га заповедных дубрав в настоящее время находится в стадии усыхания вследствие химического загрязнения.

Одним из альтернативных (возобновляемых) источников энергии часто называют ветровую энергетику. Одному из авторов этой работы в 2009 г. довелось побывать в устье р. Эйдер (Германия), впадающей в Северное море. По правому (северному) берегу расположен заповедник с типичными представителями северной флоры и фауны, по левому – насколько простирается взгляд – «долина» ветряков. Поражает разительный контраст между экосистемами двух противоположных берегов: под ветряками растительность представлена лишь редкой пожухлой травой. Сразу вспоминаешь слова: «Здесь птицы не поют, деревья не растут...». В качестве причин называют генерируемый шум, инфразвук, магнитное поле и т.п. Согласно статистике, лопасти каждой установленной турбины являются причиной гибели не менее 4 особей птиц в год. Однако до сих пор достоверной оценки экологической безопасности ветровой энергетики не существует.

Наиболее деликатный вопрос – о человеческих жертвах и рисках, как аргументах за и против ядерной энергетики. Преклоняясь перед памятью погибших при ликвидации Чернобыльской катастрофы и умерших от радиоактивного облучения в последующие годы, вспомним о неумолимой статистике жертв угольной отрасли...

Ядерная энергетика становится приоритетным сектором экономики Украины. Следует предусмотреть диверсификацию ядерных технологий, отдавая предпочтение тем, которые допускают эволюционный переход к технологиям четвертого поколения. Это даст возможность до 2030 г. заложить основы развития в нашей стране двухуровневой ядерной энергетики, когда энергетические реакторы работают в сопряжении с реакторами-трансмутаторами, обеспечивающими выжигание нежелательных изотопов [38], и, вероятно, может стать начальной фазой ноогенеза в энергетической отрасли.

### **Интенсивность биогеохимических циклов вещества техногенного происхождения**

Как показано выше, наиболее характерной чертой техносферы является катастрофизм. 26 апреля 2011 г. исполнилось четверть века со дня крупнейшей техногенной катастрофы на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС. Эта глобальная трагедия привела к загрязнению искусственными радионуклидами около 1,5 млн км<sup>2</sup> земного шара, практически полностью охватив Европу; радиоактивные выпадения достигли Великой Британии, Японии, Арктики и Средиземноморья. В результате аварии из реактора было выброшено свыше  $3 \times 10^{18}$  Бк радионуклидов, половина из которых приходится на благородные газы, до  $4 \times 10^{17}$  –  $^{131}\text{I}$ ,  $7 \times 10^{16}$  –  $^{137}\text{Cs}$ ,  $7 \times 10^{15}$  –  $^{90}\text{Sr}$  [39].

Вследствие Чернобыльской катастрофы образовалась локальная зона, объединившая в себе наиболее характерные черты техносферы, в том числе обострение главной проблемы современного периода – емкости биосферы к побочным продуктам человеческой деятельности, ее буферных, защитных свойств в условиях техногенеза.

Авария привела к радиоактивному загрязнению огромной территории: более 145 тысяч квадратных километров территории Украины, Республики Беларусь и Российской Федерации, плотность загрязнения радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  которой превышает  $37 \text{ кБк} \times \text{м}^{-2}$ .

По уникальности структуры: пространственной, временной, профессионально-возрастной, а также по сочетанию внешнего и внутреннего облучения, Чернобыльская катастрофа не имеет аналогов во всей истории техногенных катастроф. Пострадало около 5 миллионов человек, загрязнению радиоактивными нуклидами подверглись около 5 тысяч населенных пунктов Республики Беларусь, Украины и Российской Федерации. Из них в Украине – 2218 поселков и городов с населением около 2,4 млн человек. Чернобыльская авария при-

вела к беспрецедентному облучению населения вышеназванных стран.

В результате аварии образовалось огромное количество радиоактивных отходов (РАО). По состоянию на 2010 г. их общее количество в Зоне отчуждения (без объекта «Укрытие») составляет около 2,8 млн м<sup>3</sup>. В том числе в пунктах захоронения и временной локализации РАО находится свыше 1,94 млн м<sup>3</sup> отходов с общей активностью около  $7,25 \times 10^{15}$  Бк. Общая активность радиоактивных веществ в природных объектах Зоны отчуждения (поверхностные слои почвы, донные отложения водоемов, растительность и т.п.) составляет более  $8,50 \times 10^{15}$  Бк. Общая активность радионуклидов, находящихся в объекте «Укрытие» составляет примерно  $4,8 \times 10^{17}$  Бк [40].

Главной особенностью Чернобыльской аварии является сравнительно короткий во времени «импульсный» выброс, что оказалось особенно ценным для исследователей, поскольку с выбросом образовался искусственный временной маркер, используя который, можно оценить скорость последующих процессов. Объективность полученных результатов и возможность их обобщения для широкого спектра техногенных загрязнителей определяется фиксированной датой выпадений, чисто техногенной компонентой загрязнения, высокой чувствительностью радиометрических методов измерения, широким разнообразием ландшафтно-геохимических условий Украинского Полесья.

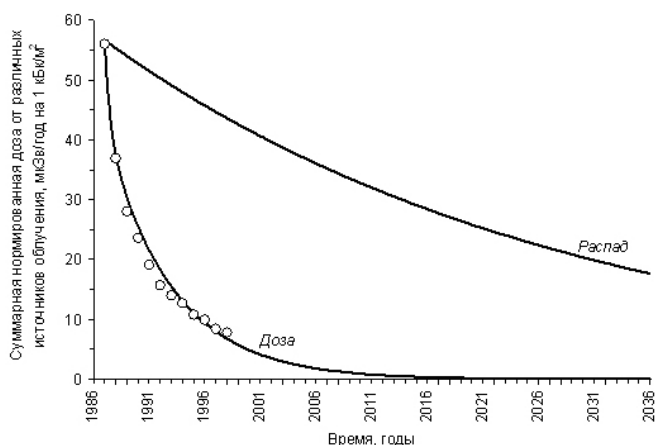
В классической отечественной теории геохимии ландшафтов самоочищение рассматривается как естественное разрушение загрязнителя в среде в результате природных физических, химических и биологических процессов [41] либо как элемент вторичной устойчивой необратимой техногенной трансформации ландшафта, связанный с выносом мобильных в данной обстановке техногенных веществ за его пределы [27]. Аналогичный подход принят Международной организацией по стандартизации с введением терминов *естественное истощение (natural attenuation)* и *естественная биоремедиация (intrinsic bioremediation)*, объединяющих все естественные процессы, включая химические, физические и биологические, ведущие к уменьшению концентрации загрязнителя в почвах или грунтовых водах [42].

Наиболее опасными в медико-биологическом отношении дозообразующими радионуклидами являются <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr. Единственным процессом, приводящим к полному выведению радионуклида из экосистемы, является радиоактивный распад. Поэтому естественно использовать скорость физического распада этих радионуклидов в качестве основного критерия оценки процессов самоочищения. Многолетняя динамика дозовых нагрузок на сельское население Украины свидетельствует о значительном (на порядок) превышении темпов снижения дозовых нагрузок по сравнению со скоростью физического распада дозообразующих радионуклидов (рис. 6).

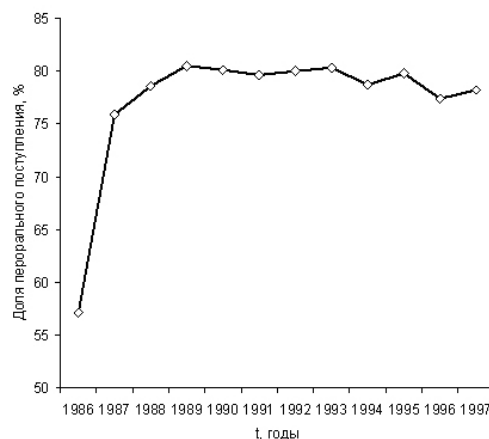
Рацион сельского населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, в значительной степени состоит из продуктов питания местного производства (картофель, молоко). В формировании современных доз облучения пероральное поступление радионуклидов играет ведущую роль: при значительном уменьшении годовых доз доля, приходящаяся на облучение, обусловленное пероральным поступлением, уже в 1988 г. возросла до 80 % (рис. 7). Это определяет исключительную роль трофического звена «почва–растение» в формировании дозовых нагрузок и дает основания для концептуального пересмотра понятия самоочищения экосистемы. Таким образом, с точки зрения экологической безопасности *самоочищение экосистемы* включает все те природные процессы, которые приводят к выведению загрязнителя за пределы трофической цепи. В отличие от представлений, сложившихся в геохимии, ведущую роль в самоочищении экосистем играют процессы пролонгированной фиксации загрязнителя в почвенном поглощающем комплексе, не обязательно сопровождающиеся его разрушением либо выведением за пределы ландшафта. Следовательно, изучение процессов биогенной миграции радионуклидов в экосистемах загрязненных территорий, приобретает особое значение.

После выпадения на земную поверхность радионуклиды включаются в процессы абиогенной трансформации, ведущие к образованию наиболее доступных для раститель-

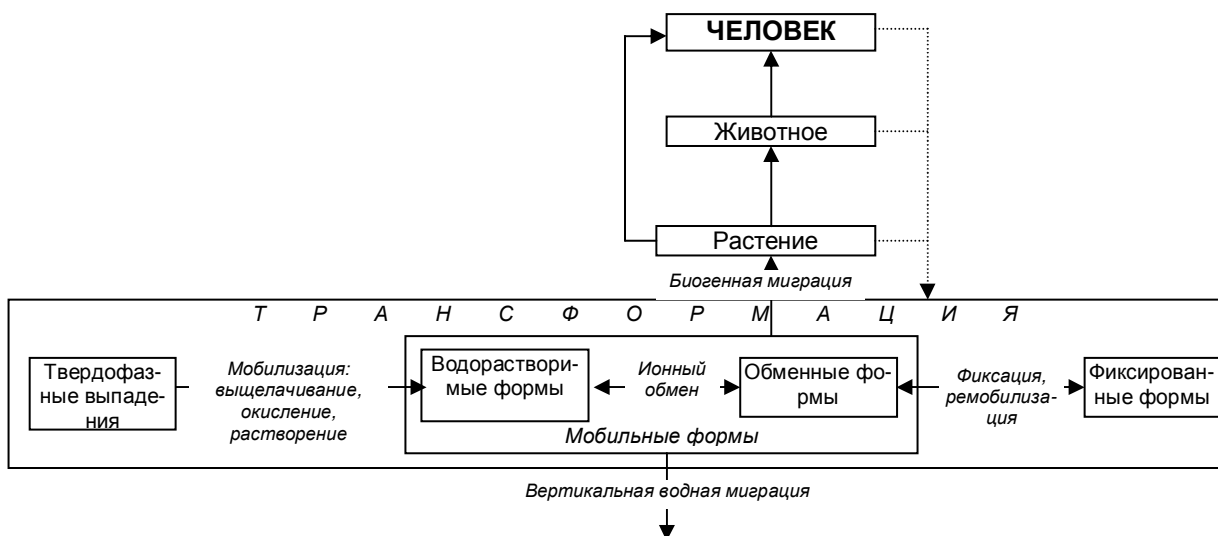
ности мобильных (водорастворимых и обменных) форм (рис. 8). В процессе корневого питания в области ризосферы (около 1 мм вокруг корня растения) создается кислая среда (по некоторым данным рН достигает 3 и даже 1) [44].



**Рис. 6.** Темпы снижения дозовых нагрузок на сельское население Украины: D – суммарная (от различных источников) нормированная годовая доза облучения,  $\text{мкЗв} \times \text{год}^{-1}$  на  $1 \text{ кБк} \times \text{м}^{-2}$ ; точками обозначены экспериментально-расчетные данные [43]; верхняя кривая отражает динамику распада дозообразующих радионуклидов



**Рис. 7.** Доля перорального поступления радионуклидов в формировании суммарной дозы облучения сельского населения Украины: рассчитано по данным И.А. Лихтарева и др. [43]



**Рис. 8.** Биогенные и абиогенные процессы трансформации и миграции радионуклидов

В.И. Вернадский неоднократно указывал, что при геохимическом анализе почв необходимо учитывать балансовые соотношения живого вещества и косной материи: «...вопрос, который стоит перед нами, – о массе живого вещества и продуктов его изменения, которые всегда входят в состав почвы, на определенную ее площадь» [45]. Такой подход был применен для оценки интенсивности биогеохимического потока, представляющего собой количество вещества, проходящего за единицу времени через единицу площади условной границы раздела между биотической и абиотической составляющими экосистемы. В основу его положен анализ временной динамики геохимического коэффициента перехода ( $ГКП$ ) техногенных радионуклидов, представляющего собой отношение содержания загрязнителя в растительности, собранной с  $1 \text{ м}^2$  почвы ( $\Psi_p$ ) к плотности за-

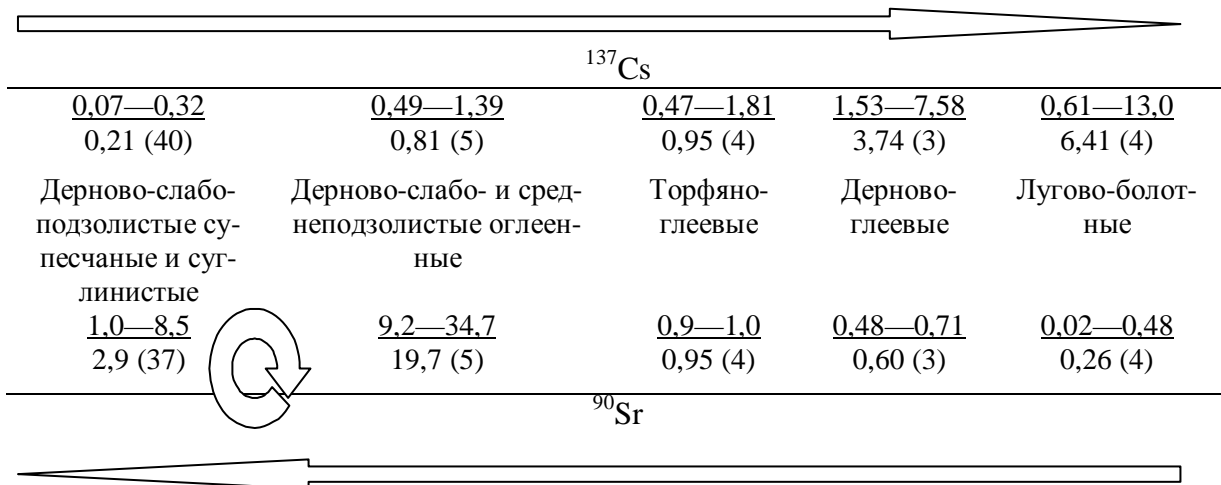
грязнения этой площади:

$$ГКП = \frac{\Psi_p [Бк \times М^{-2}]}{\Psi_n [Бк \times М^{-2}]}$$

Характеризуя поток загрязнителя на основе балансовых расчетов, эта величина автоматически учитывает продуктивность биомассы. Абсолютные значения *ГКП* радионуклидов в луговых экосистемах радиоактивно загрязненных территорий Киевского и Житомирского полесья находятся в пределах  $n \times (10^{-5} - 10^{-3})$ , что свидетельствует о незначительном выносе радионуклидов биогеохимическим потоком (рис. 9).

Значения *ГКП*  $^{137}\text{Cs}$  возрастают с приростом биомассы и ухудшения условий дренирования для ряда почв: дерново-слабо- и среднеподзолистые супесчаные и суглинистые, торфяно- и дерново-глеевые, лугово-болотные. *ГКП*  $^{90}\text{Sr}$  возрастает в обратном ряду. В этом же ряду возрастают значения отношения *ГКП*  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  от 0,23 до 25,5.

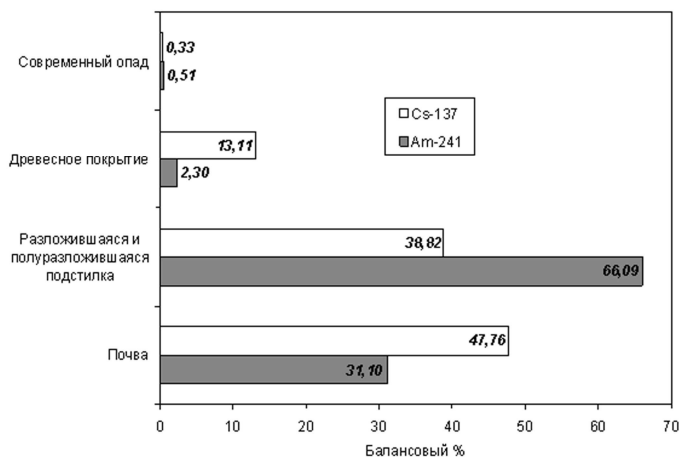
Очевидно, что интенсивность биогеохимического потока загрязнителя обратно пропорциональна скорости самоочищения экосистемы. Скорость самоочищения начального звена трофической цепи в сухих лугах на дерново-подзолистых почвах в 14 раз превышает скорость физического распада  $^{137}\text{Cs}$ , на переувлажненных лугово-болотистых почвах – в 5 раз меньше [46]. Для  $^{90}\text{Sr}$  характерны противоположные тенденции. Скорость самоочищения несколько уменьшается в ряду от переувлажненных до сухих лугов. По мере установления изотопного равновесия происходит «разбавление» нуклида в массе его стабильного (природного) аналога. Вследствие этого процессы поглощения радионуклидов и их природных аналогов со временем должны постепенно уравниваться. Стронций значительно активнее в малом биологическом кругообороте, чем цезий, соответственно, установление изотопного равновесия для него значительно ускоряется.



**Рис. 9.** Геохимический коэффициент перехода радионуклидов в луговых экосистемах Украинского Полесья: значения *ГКП*:  $n \times 10^{-3}$ ; над чертой приведены предельные значения, под чертой – среднее арифметическое, в скобках – количество точек наблюдения

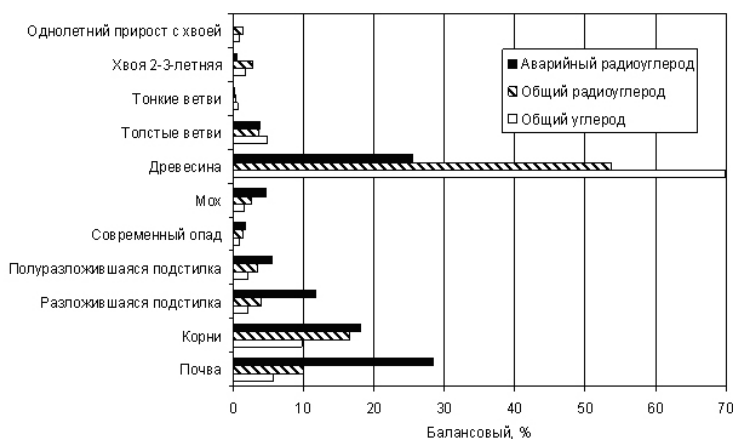
Биогеохимические потоки радионуклидов в лесных биогеоценозах характеризуются значительно более сложными закономерностями, что связано с многоярусным строением экосистемы, различными временными периодами, биологическими особенностями жизненных циклов растительности и т.п. Основная часть  $^{137}\text{Cs}$  (82—97 %) в лесоболотных экосистемах Украинского Полесья содержится в минеральных слоях почвы и лесной подстилке, 0,3—16 % – в моховом, менее 0,002 % – в лишайниковом, 0,05—0,5 % – в травяном и кустарниковом ярусах, 0,01—0,05 % – в ярусе микромицетов, 0,3—5 % – в древесном ярусе [47]. По усредненным для различных эдафотопов значениям балансового распределения  $^{137}\text{Cs}$  в экосистемах сосны обыкновенной в ближней зоне ЧАЭС (Янов, Новошепеличи, Толстый Лес, Копачи) около 13,5 % включено в процессы биогеохимической

миграции (современный опад и древесное покрытие), более 85 % иммобилизовано в почве и разложившихся слоях лесной подстилки. В современные биогеохимические циклы в экосистеме сосны включено менее 3 %  $^{241}\text{Am}$  (рис. 10).



**Рис. 10.** Усредненные показатели балансового распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$  в экосистеме сосны (*Pinus silvestris* L.) ближней зоны ЧАЭС

рийного выброса ЧАЭС значительно менее биодоступен: менее 30 % его содержится в древесном ярусе и до 30 % – в минеральных слоях почвы в виде горячих частиц (рис. 11). В подстилке различной степени разложения  $^{14}\text{C}$  аварийных выпадений представлен преимущественно твердофазными выпадениями, разлагающимися в окислительных условиях при температуре свыше 900 °С. Цикличность современной эмиссии  $^{14}\text{CO}_2$  в экосистеме сосны ближней зоны ЧАЭС ограничена нижними ярусами лесного биогеоценоза (почва–подстилка–мох). Современное поступление  $^{14}\text{C}$  в биотические ярусы определяется процессами корневого питания.



**Рис. 11.** Баланс изотопов углерода в экосистеме сосны ближней зоны ЧАЭС

тельствует о едином геохимическом механизме миграции техногенных веществ в биосфере. Темпы самоочищения радиоактивно загрязненных экосистем (выведения радионуклидов за пределы трофической цепи) на порядок превышают скорость радиоактивного распада дозообразующих изотопов, что отражается в динамике дозовых нагрузок на сельское население Украины.

Восстановление радиоактивно загрязненных экосистем в условиях снятия антропогенного пресса происходит значительно быстрее и глубже, чем техногенное преобразова-

В процессе горения графитовой кладки аварийного энергоблока в составе аэрозолей горячих частиц и в виде газовой эмиссии было выброшено около  $1,12 \times 10^{14}$  Бк радиоуглерода. В биотических ярусах сосновой экосистемы (включая разложившиеся слои подстилки) содержится около 95 % углерода, в том числе 75 % – в древесном ярусе. Балансовое распределение радиоуглерода аварийного выброса и глобальных выпадений существенно отличается. Биотические компоненты биогеоценоза обеднены радиоуглеродом глобальных выпадений: в древесном ярусе содержится менее 55 % глобального  $^{14}\text{C}$ . Радиоуглерод ава-

Вышеизложенные результаты многолетних исследований перераспределения радионуклидов в экосистемах Чернобыльской зоны отчуждения свидетельствуют о невысокой интенсивности биогеохимических потоков веществ техногенного происхождения, что обусловлено химическими свойствами форм их выпадения на земную поверхность и барьерными свойствами зоны аэрации. Совпадение динамики абиогенного формообразования искусственных радионуклидов в сухопутных и водных экосистемах [48] свиде-



ние этой территории в прошлом. Природное восстановление болотных ландшафтов сопровождается увеличением биоразнообразия.

В зоне летального поражения лиственные породы полностью восстановили свое состояние. На месте погибших насаждений образовались типичные группировки вырубки-пожарища. В зоне сублетального поражения сосны сохранились на 20—85 %. По большей части здесь началось формирование самосевных популяций лиственных пород. Уцелевшие редкие экземпляры сосны имеют широкую крону, не характерную для деревьев, произрастающих в насаждениях. В последние годы на границе «Рыжего леса» между материнскими деревьями появился неравномерный самосев сосны [49].

Исследования растительного покрова Зоны отчуждения, проведенные после Чернобыльской аварии, продемонстрировали значительную видовую насыщенность фитоценозов. Наблюдается увеличение флоры сосудистых растений примерно на 10 %. В Зоне отчуждения успешно развиваются популяции сосудистых растений, внесенных в «Червону книгу України» (2009) [50]. В зоне безусловного отселения Житомирской области обнаружено более 40 видов, внесенных в «Червону книгу України» (2009), выявлено 16 новых для Житомирской области видов лишайников и лишенофильных грибов [51].

Как для растительного, так и для животного мира радиоактивное загрязнение не привело к сколько-нибудь заметным негативным последствиям для видового разнообразия. В то же время ограничение антропогенной деятельности стало мощным фактором увеличения не только численности видов, но и их популяций. В настоящее время в Зоне отчуждения численность популяций крупных промысловых копытных – лося, дикого кабана и косули европейской многократно превосходит доаварийные показатели. Аналогичная картина наблюдается и для зайца-русака, мышевидных грызунов, что, в свою очередь привело к увеличению численности популяций хищников, в частности волка, лисицы, рыси европейской, для которых кормовая база также значительно больше доаварийной. В последние годы с севера – из Белорусского Полесья – практически вплотную к Зоне отчуждения приблизился ареал бурого медведя. Прекращение функционирования осушительных систем и их зарастание древесно-кустарниковой растительностью в Зоне отчуждения привело к значительному увеличению численности бобра европейского, который, в свою очередь, захватывая все новые места обитания, уже является причиной зоогенных сукцессий растительного покрова вследствие затопления и подтопления территории [52].

Биогеохимическая барьерность зоны аэрации и существенно меньшая интенсивность вовлечения вторичных продуктов техногенной деятельности в биогеохимические циклы по сравнению с природными аналогами наблюдается в зонах влияния металлургического, машиностроительного, нефтегазового и пр. комплексов [53, 54].

Таким образом, устойчивость современного состояния биосферы в условиях катастрофического развития техносферы определяется незначительным количеством вещества техногенного происхождения, вовлекаемого в биогеохимические циклы. Природа пока еще успешно противостоит человеческой деятельности по ее уничтожению. Однако вопрос пределов емкости биосферы к продуктам техногенеза остается весьма насущным.

### **Заключение**

Эволюция биосферы на современном этапе определяется развитием техносферы, наиболее характерной чертой которой является катастрофизм. Техногенная эволюция биосферы сопровождается активизацией геологических процессов, возрастанием количества мощных сейсмических событий, других природных катаклизмов. С развитием технических средств возрастает количество и масштабы техногенных катастроф, экономических и политических кризисов.

Приобретение человеком «главной геологической силы» нарушает термодинамическое равновесие планеты. Фанерозой длится около 570 млн лет. Но лишь за последние несколько столетий объемы вещества литосферы, вовлеченные в процесс техногенеза, превысили осадконакопление в фанерозое почти на порядок. Природа пытается образумить

человечество. Возможно, активизация геологических процессов, наблюдаемая в современный период, является одним из способов восстановления термодинамического равновесия планеты.

В.И. Вернадский, рассуждая о ноосфере, наиболее высоко ценил умственные способности человека. В 20—30-е гг. прошлого века, когда биосфера еще успешно перерабатывала продукты жизнедеятельности человечества, а научно-техническая революция (термин техногенез в то время еще не был введен) – казалась способной обеспечить комфортное проживание, – такой оптимизм В.И. Вернадского вполне был оправдан. Золотой миллиард (наиболее цивилизованная часть человечества) постепенно тает (рождаемость в европейских странах падает, в Китае – директивно ограничивается), а при этом возрастает население слаборазвитых религиозно агрессивных наций. В результате нарушается принцип «равенства всех стран и религий», выдвинутый В.И. Вернадским, как одно из важнейших условий построения ноосферы. Как следствие – обнищание, голод, экстремизм (терроризм), междоусобные войны. И все это на фоне резкого усиления нестабильности биосферы – увеличение количества природных катастроф, что стимулирует катастрофы техногенные.

Тем не менее, природно-техногенный катастрофизм способствует развитию «научной мысли» в планетарном масштабе, интеграции научных направлений и технических разработок, развитию междисциплинарных отраслей науки. На современном этапе биогеохимические исследования выходят далеко за пределы изучения влияния живого вещества на формирование химического состава земной коры, и развивается новое направление в биогеохимии, изучающее взаимное влияние живого и неживого вещества на формирование химического и ценотического состава биосферы в условиях становления человека как главной геологической силы планеты.

Несмотря на катастрофическое развитие техносферы, результаты эколого-геохимических исследований позволяют сделать вывод о сравнительной устойчивости современного эволюционного состояния биосферы, что определяется стабильностью биогеохимических потоков и незначительным количеством техногенного вещества, вовлекаемого в биогеохимические циклы. Восстановление ландшафтной структуры, растительных сукцессий и животного мира на территориях, загрязненных до летальных и сублетальных уровней, происходит значительно быстрее и глубже, чем их техногенное преобразование в прошлом, что, прежде всего, обусловлено принудительным ограничением антропогенной деятельности.

«Человек, как он наблюдается в природе – как и все живые организмы, как всякое живое вещество, – есть определенная **функция биосферы**, в определенном ее пространстве – времени» [15]. На современном этапе эволюции, создав техносферу, человек противопоставил себя биосфере.

Как минимум дважды в истории нашей планеты, в юрском и ледниковом периодах, биосфера была большей частью уничтожена, что привело к вымиранию доминирующих видов. Вследствие бомбардировки астероидами вымерли динозавры, в период глобального похолодания – мамонты. Оправдывая прогнозы В.И. Вернадского, человек сегодня стал главной геологической силой планеты. Однако пользоваться этой силой научился не в полном объеме, что определяет угрозу деградации и возможного уничтожения цивилизации вследствие техногенной деятельности. Но, даже если мы уничтожим себя, биосфера впоследствии восстановится до стабильного состояния. Поскольку «все без исключения геохимические функции живого вещества в биосфере могут быть исполнены простейшими одноклеточными организмами» [9].

Человечество в целом всегда жило и до сих пор живет сегодняшним днем. Даже тот самый «золотой миллиард сытых», к которому вроде бы относится Украина, свое благосостояние создает путем преобразования биосферы в неорганизованную свалку мусора. Если темпы производства и накопления отходов будут сохраняться, то будущее нашей техногенной цивилизации измеряется одним-двумя столетиями. Альтернатива такому без-

дарному концу – в нашей действительной, а не декларативной разумности. Наша беда в том, что научный прогресс служит удовлетворению потребностей сегодняшнего дня, и мы практически ничего не предпринимаем для предотвращения трагической развязки. Главным приоритетом научных исследований должна стать экологическая стабилизация биосферы.

Основные пути преодоления противоречий между техносферой и ноосферой заключаются в глобальном внедрении замкнутого производственного цикла и доведения уже накопленных отходов до состояния, которое вписывается в природные биогеохимические циклы. Нам необходимо выиграть время до тех пор, когда мы сумеем создать безотходные технологии получения энергии. Пока что наиболее приемлемое, что у нас есть – ядерная, а в будущем – термоядерная энергетика. Они, увы, не безотходны. Развитие в Украине двухуровневой ядерной энергетике, когда энергетические реакторы будут работать в сопряжении с реакторами-трансмутаторами, обеспечивающими выжигание нежелательных изотопов, может стать начальной фазой ноогенеза в энергетической отрасли.

В.И. Вернадский искренне верил в будущее разумного человечества. «Процессы, подготовлявшиеся многие миллиарды лет, не могут быть преходящими, не могут остановиться. Отсюда следует, что биосфера неизбежно перейдет, так или иначе, рано или поздно, в ноосферу, то есть, что в истории народов, ее населяющих, произойдут события, нужные для этого, а не этому процессу противоречащие» [15]. Гений великого ученого, сумевшего интегрировать науки о Земле, жизни и космосе в единое естественно-философское мировоззрение, показал нам путь дальнейшего развития. Выход из тупика техносферы и развитие ноогенеза сегодня, как и во времена В.И. Вернадского, определяется планетарной интеграцией научной мысли.

1. *Вернадский В.И.* Несколько слов о ноосфере // *Успехи современной биологии.* – 1944. – № 18, вып. 2. – С. 113–120.
2. *Каиммилов М.М.* Эволюция биосферы. – М.: Наука, 1979. – 254 с.
3. *Lamarck J.-B.* Hydrogéologie (1802). – Paris: CRHST/CNRS, 2003. – 269 p.
4. *Самин Д.К.* 100 великих научных открытий. – М.: Вече, 2008. – 479 с.
5. *Suess E.* Die Entstehung der Alpen. – Wien: W. Braunnmuller, 1875. – 168 p.
6. *Suess E.* The face of the Earth (Das Antlitz der Erde) / Translated by H.B.C. Sollas under the direction of W.J. Sollas. – Oxford Clarendon Press, 1909. – V. 4. – 673 p.
7. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения / Под ред. Ф.Т. Яншиной, С.Н. Жидовинова. – М.: Наука, 2001. – 376 с.
8. *Вернадский В.И.* Очерки геохимии // *Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського.* – Т. 7, кн. 1: *Праці з геохімії та радіогеології* / За ред. Е.В. Собоновича, В.В. Доліна, Г.М. Бондаренка, Р.Я. Белєвцева. – Київ: НАН України, 2012. – С. 235–624.
9. *Вернадский В.И.* Об условиях появления жизни на Земле // *Изв. Академии наук СССР.* – 1931. – С. 633–653.
10. *Dalrymple G.B.* The Age of the Earth. – Stanford University Press, 1991. – 492 p.
11. *Touboul M., Kleine T., Bourdon B. et al.* Tungsten isotopes in ferroan anorthosites: implications for the age of the Moon and lifetime of its magma ocean // *Icarus.* – 2009. – V. 199. – P. 245–249.
12. *Федонкин М.А.* Две летописи жизни: опыт сопоставления (палеобиология и геномика о ранних этапах эволюции биосферы) // *Проблемы геологии и минералогии* / Под ред. А.М. Пыстина. – Сыктывкар: Геопринт, 2006. – С. 331–350.
13. *Heges S.B., Kumar S.* Genomic clocks and evolutionary timescales // *Trends in Genetics.* – 2003. – **19**, № 4. – P. 200–206.
14. *Вернадский В.И.* Начало и вечность жизни. – Петроград: Изд-во «Время», 1922. – 58 с.
15. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетарное явление // *Отв. ред. А.Л. Яншин.* – М.: Наука, 1991. – 268 с.
16. *Вернадский В. И.* Несколько слов о ноосфере // *Успехи современной биологии.* – 1944. – № 18. – С. 113–120.
17. *Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И.* Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
18. *Яншина Ф.Т.* Эволюция взглядов В.И. Вернадского на биосферу и развитие учения о ноосфере. – М.: Наука, 1996. – 222 с.
19. *Вернадский В.И.* Эволюция видов и живое вещество // *Природа.* – 1928. – № 3. – С. 227–250.

20. Ферсман А.Е. Избранные труды. Т.4: Геохимия. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 588 с.
21. Ермаков В.В. Биогеохимическая эволюция таксонов биосферы в условиях техногенеза // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы / Под ред. В.В. Ермакова. – М.: Наука, 2003. – С. 5—22.
22. Норе V.K. A global biogeochemical budget for vanadium // *Sci. Total Environment*. – 1994. – V. 141. – P. 1—10.
23. Mukherjee A.B. Behavior of heavy metals and their remediation in metalloferrous soils // *Metals Environment / Ed.: M.N.V. Prasad. N.-Y.-Basel: Marcel Dekker Inc., 2001. – P 433—471.*
24. Расуна J.M. Contribution of elements to the atmosphere from natural sources // *Chemical climatology geomedical problems / Ed.: J. Lag. – Oslo: The Norweg. Ac. Sci. Let., 1992. – P. 91—104.*
25. Тютюнова Ф.И. Гидрогеохимия техногенеза. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
26. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. – М.: Наука, 1976. – С. 19—85.
27. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
28. Вернадский В.И. Лекции по геохимии... // Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського. – Т. 7, кн. 1: Праці з геохімії та радіогеології / За ред. Е.В. Собоновича, В.В. Доліна, Г.М. Бондаренка, Р.Я. Белевцева. – Київ: НАН України, 2012. – С. 53—232.
29. Собонович Э.В., Ольштынський С.П. Геохимия техногенеза / Отв. Ред. Г.В. Войткевич. – Киев: Наук. думка, 1991. – 228 с.
30. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2004 році. – Київ: Мінприроди України, 2005. – 227 с.
31. US Geological Survey [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.usgs.gov>.
32. Онлайн справочник “Everyday” [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.everyday.com.ua](http://www.everyday.com.ua)
33. Plane Crash Info [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://planecrashinfo.com/>
34. World Nuclear Association: Nuclear Database [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.world-nuclear.org>.
35. Абдеев Р.Ф. Философия информационной цивилизации. – М.: ВЛАДОС, 1994. – 336 с.
36. Коваленко Г.Д., Рудя К.Г. Радиоэкология Украины. – Киев: Издательско-полиграфический центр «Київський університет», 2001. – 167 с.
37. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р. – Київ, 2006. – 129 с.
38. Патон Б.Є., Бакай О.С., Бар'яхтар В.Г., Неклюдов І.М. Про стратегію розвитку ядерної енергетики в Україні // *Світогляд*. – 2010. – № 5 (25). – С. 4—17.
39. Чернобыльская катастрофа / В.Г. Барьяхтар (гл.ред.) – Киев: Наук. думка, 1995. – 559 с.
40. 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: Національна доповідь України / За ред. В.І. Балогі, В.І. Холоші, О.М. Євдіна, Г.П. Перепелятнікова. – Київ: КІМ, 2011. – 367 с.
41. Реймерс Н.Ф. Охрана природы и окружающей человека среды: Словарь-справочник. – М.: Просвещение, 1992. – 320 с.
42. ISO 11074-4. Soil quality – Vocabulary – Part 4: Terms and definitions related to the rehabilitation of soils and sites. – Geneva, 1999. – 22 p.
43. Ретроспективно-прогнозні дози опромінення населення та загальнодозиметрична паспортизація 1997 р. населених пунктів України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської аварії. Узагальнені дані за 1986—1997 рр. Збірка 7 / За ред. І.А. Ліхтарєва. – Київ: МНС України, 1998. – 155 с.
44. Natural Remediation of Environmental Contaminants: its Role in Ecological Risk Assessment and Risk Management / M. Swindoll, R.G. Stahl, S.J. Ells (Eds). – Pensacola-Blussels: SETAC, 2000. – 472 p.
45. Вернадский В.И. Об участии живого вещества в создании почв // Вибрані наукові праці академіка В.І. Вернадського. – Т. 7, кн. 2: Праці з геохімії та радіогеології / За ред. Е.В. Собоновича, В.В. Доліна, Г.М. Бондаренка, Р.Я. Белевцева. – Київ: НАН України, 2012. – С. 499—523.
46. Долін В.В., Бондаренко Г.М., Орлов О.О. Самоочищення природного середовища після Чорнобильської катастрофи / За ред. Е.В. Собоновича. – Київ: Наук. думка, 2004. – 221 с.
47. Орлов О.О., Долін В.В. Біогеохімія цезію-137 у лісоболотних екосистемах Українського Полісся / За ред. Е.В. Собоновича. – Київ: Наук. думка, 2010. – 198 с.
48. Геохимия техногенных радионуклидов / Под ред. Э.В. Собоновича, Г.Н. Бондаренко. – Киев: Наук. думка, 2002. – 332 с.
49. Бідна С.М. Демутаційні процеси в Чорнобильській зоні відчуження та їх використання для заліснення радіаційно забруднених територій: автореф. дис. канд. сільгосп. наук: 06.03.03. – Київ, 2000. – 21 с.
50. Автореабілітаційні процеси в екосистемах Чорнобильської зони відчуження / За ред. Ю.О. Іванова, В.В. Доліна. – Київ, 2001. – 250 с.
51. Федоренко Н.М., Кондратюк С.Я., Орлов О.О. Лишайники та ліхенофільні гриби Житомирської області. – Житомир: ПП «Рута», Вид-во «Волинь», 2006. – 148 с.

52. Гащак С.П., Вишневський Д.О., Заліський О.О. Фауна хребетних тварин Чорнобильської зони відчуження (Україна) / За заг. ред. С.П. Гащака. – Славутич: Вид-во Чорнобильського центру з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології, 2006. – 100 с.
53. Долін В.В., Смирнов В.Н., Ицук А.А., Орлов А.А. Техногенно-екологическая безопасность биосистемы Бугского лимана в условиях загрязнения тяжелыми металлами / Под ред. Э.В. Собоновича. – Киев-Николаев: РАЛ-поліграфія, 2011. – 200 с.
54. Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы / Под ред. В.В. Ермакова // Тр. биогеохимической лаборатории. М.: ГЕОХИ РАН, 2003. – Т. 24. – 351 с.

**Собонович Е.В., Долін В.В. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ БІОСФЕРИ**

*До розвитку ідей В.І. Вернадського щодо еволюції біосфери в ноосферу визначено ключові проблеми її сучасної проміжної стадії – техносфери. Проілюстровано часову динаміку природного та техногенного катастрофізму. Темпи техногенезу оцінено за розвитком ядерної енергетики. На прикладі штучних радіонуклідів розглянуто інтенсивність біогеохімічних циклів речовини техногенного походження. Визначено глобальні завдання екологічної стабілізації біосфери.*

**Sobotovich E.V., Dolin V.V. MODERN PROBLEMS OF ECOLOGICAL STABILIZATION OF THE BIOSPHERE**

*The paper is devoted to development of V.I. Vernadsky's idea on the evolution of Biosphere toward Noosphere. The key problems of modern interim stage of this evolution named "Technosphere" are determined. The temporal dynamics of natural and technogenic catastrophes is illustrated. The technogenesis rate is assessed in conformity with the development of nuclear power engineering. Biogeochemical flux of matter of man-caused origin is considered on the example of artificial radionuclides. Global issues for ecological stabilization of the Biosphere are determined.*