

ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РОЛЬ ХИМИИ В ИХ РЕШЕНИИ

Н.П.Тарасова, чл.-корр. РАН, д.х.н., проф., Институт химии
и проблем устойчивого развития РХТУ имени Д.И.Менделеева
Н.И.Василевич, к.х.н., редакция журнала "Аналитика"

УДК 504.75.05; ВАК 03.02.08

Начиная с 50-х годов прошлого столетия остро встал вопрос о влиянии человеческой деятельности на состояние биосферы Земли. Это привело к постепенному становлению концепции устойчивого развития (sustainable development), цели и задачи которой были приняты ООН в 2015 году. Описаны предпосылки возникновения этой концепции, этапы ее становления и роль химии в решении глобальных проблем. Особое внимание уделяется научному направлению "зеленая химия", возникшему в конце 20 века.

По различным оценкам, человек разумный появился на Земле около 70–100 тыс. лет назад [1]. За это время из существа, приспособившегося к природным условиям, он превратился в мощную преобразующую силу, которая влияет на процессы, протекающие в окружающей среде. Начавшаяся в 18 веке промышленная революция, которая заключалась в переходе от аграрного общества к индустриальному, сопровождалась урбанизацией и демографическими изменениями. В результате промышленной революции деятельность человека приобрела глобальный масштаб, при этом остро встал вопрос о влиянии человека на состояние биосферы и судьбу планеты в целом. В своих усилиях по повышению урожайности сельскохозяйственных культур, защите их от вредителей, получению новых материалов и продуктов, развитию транспорта, созданию медикаментов человечество наносило непреднамеренный вред планете. В связи с этим в 1960–1970-е годы стали появляться научные работы, посвященные вопросам конечности природных ресурсов и отрицательному влиянию человеческой деятельности на окружающую среду. Логическим продолжением накопления научных знаний стала концепция устойчивого развития, согласно которой экономическое и социальное развитие должно сочетаться с сохранением живой природы, защитой структуры, функций и разнообразия природных систем Земли.

использовать "космический календарь" [2], в котором время существования материального мира, то есть около 14 млрд лет, нормировано на 1 год (табл.1). В таком масштабе одна

Таблица 1. Космический календарь Карла Сагана

Большой взрыв	1 января 0 ч 0 мин
Образование галактик	10 января
Образование Солнечной системы	9 сентября
Образование Земли	14 сентября
Возникновение жизни на Земле	25 сентября
Выход кислорода в атмосферу	1 декабря
Первые рыбы	19 декабря
Первые динозавры	24 декабря
Первые млекопитающие	26 декабря
Первые птицы	27 декабря
Первые приматы	29 декабря
Первые гоминиды	30 декабря
Первые люди	31 декабря, 22 часа 30 мин

МЕСТО ЧЕЛОВЕКА В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Для удобства визуализации событий, происходивших на протяжении истории развития Вселенной, американским астрофизиком Карлом Саганом было предложено

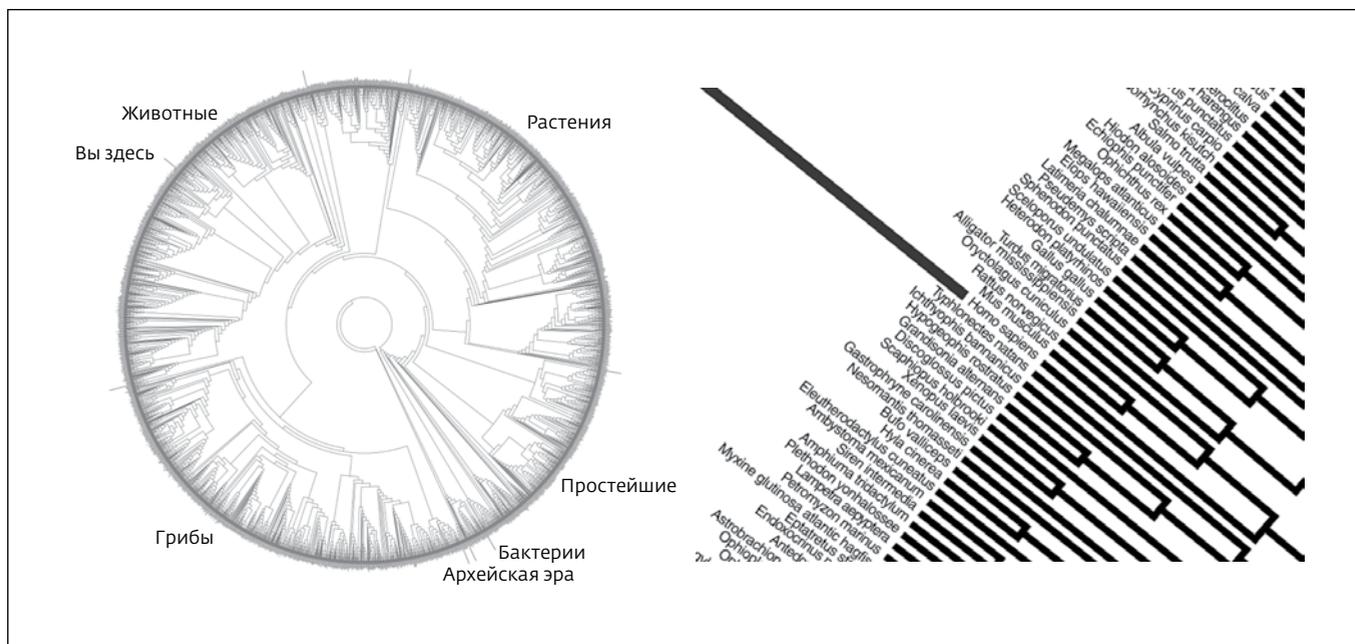


Рис.1. Древо жизни, построенное проф. Д.М.Хиллом (D.M.Hillis) из Университета Техаса (Остин) на основании последовательностей рибосомных РНК, взятых у 3 тыс. особей, принадлежащих разнообразным биологическим видам

секунда равна 438 годам реального времени, на один час приходится 1,58 млн лет, а за день проходит 37,8 млн лет. Согласно космическому календарю, Большой взрыв происходит на полночь 1 января, а первые люди появились полтора часа назад.

Биологическое богатство нашей планеты чрезвычайно велико и составляет около 8,7 млн биологических видов [3]. На древе жизни, изображенном на рис.1, отражены эволюционные взаимосвязи между различными видами, живущими на нашей планете и имеющими общего предка [4]. Homo sapiens является только одним из видов богатейшего мира Земли и среди биологических видов занимает место между мышью и небольшим пресмыкающимся.

В то же время человечество расселилось по всей планете, по тем экологическим нишам, где жить ему, как биологическому виду, не положено. Академик Никита Николаевич Моисеев, выдающийся математик и философ, один из создателей модели ядерной зимы, говорил, что основная причина подобного распространения – это существование у человека разума, то есть способности посмотреть на себя со стороны и сделать некий прогноз. Именно благодаря существованию разума, человек отделился от остальной природы, нарушая привычные законы эволюционного отбора. Развитие человека идет совершенно иным путем и подчиняется иным закономерностям по сравнению с другими живыми существами, сравнимыми с ним по массе. Животные, по массе сопоставимые человеку, достигают половой зрелости в 2–3 года. В результате эволюции у человека возникла

задержка в половом созревании для того, чтобы дать время сформироваться разуму и сознанию.

В 1981 году Джон Дамут (John Damuth) предложил закон, связывающий численность популяции млекопитающих с их массой тела [5]. Согласно этому закону, численность популяции линейно зависит от массы тела особи в логарифмических координатах с тангенсом угла наклона, равным $-0,75$ (рис.2) [6, 7].

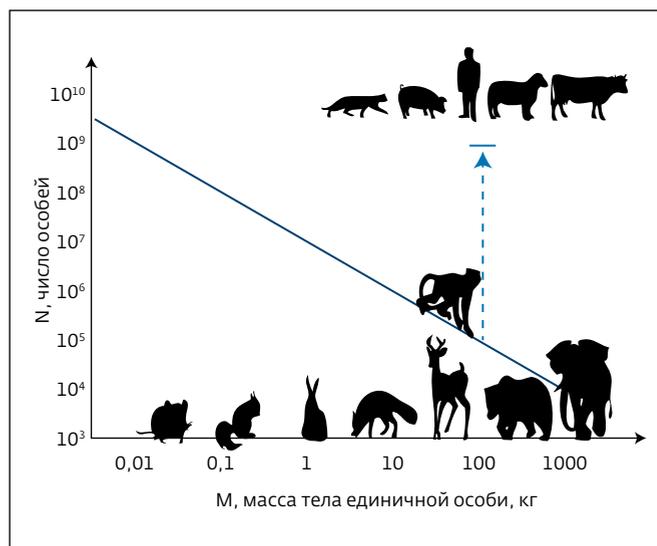


Рис.2. Зависимость размера популяции биологических видов от массы единичной особи

Исторический процесс на наших глазах коренным образом меняется. <...> Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. И перед ним, перед его мыслью и трудом, становится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого. В.И.Вернадский [8]

Другими словами, чем меньше масса единичной особи, тем больше таких существ обитает на планете. Поскольку по массе человек соответствует приматам, согласно обычным эволюционным принципам, численность его популяции как биологического вида должна была бы составлять менее полумиллиона. В то же время население Земли превышает эту цифру на несколько порядков, достигнув величины порядка 7,2 млрд человек; из общей эволюционной закономерности выпадают также "продукты питания" человека и его "друзья", например, на планете обитает более 2 млрд коров и более полумиллиарда собак.

Выйдя из-под контроля естественного отбора, человек, по словам одного из величайших мыслителей 20 века академика Владимира Ивановича Вернадского, стал геологической силой на планете.

Согласно мнению многих ученых, в 1950-е годы в результате активной индустриализации мир вступил в новую геологическую эпоху, при которой уровень человеческой активности играет существенную роль в экосистеме Земли. Для обозначения этой эпохи экологом Юджином Стормером (Eugene F. Stoermer) и Нобелевским лауреатом химиком Полом Крутценом (Paul Crutzen) был предложен новый геохронологический термин "антропоцен". В 2008 году этот термин был вынесен на рассмотрение Комиссии по стратиграфии Геологического общества Лондона, а в 2016 году инициатива была поддержана делегатами 35-й сессии Международного геологического конгресса [9].

ВЛИЯНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА ГЛОБАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ

Проблематику глобального развития можно представить как некую систему – совокупность взаимосвязанных компонентов цивилизации и природы, возникшую и развивающуюся в результате деятельности индивидов, социальных и культурных сообществ и всего человечества. Одна из важнейших особенностей глобальной системы – множество субъектов деятельности с различными потребностями, интересами и целями. Между различными целями, между целями и результа-

тами деятельности неизменно возникают противоречия, которые порождают проблемы, характерные для каждого крупного этапа развития системы.

Для изучения взаимодействия между системами Земли и человечеством в 1970 году Римский клуб – международная группа выдающихся бизнесменов, политических деятелей и ученых – поручил Деннису Медоузу (Dennis Meadows), сотруднику отдела системной динамики в Слоуновской школе менеджмента Массачусетского технологического института, возглавить группу по разработке прогноза мирового развития.

Авторами были разработаны модели, в которых были учтены пять основных глобальных составляющих: производство промышленной продукции, численность населения, производство продуктов питания, запасы невозобновимых природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. Ни один из этих факторов не является независимым: численность населения не может увеличиваться, если нет продуктов питания, производство продуктов питания растёт с ростом капитала, рост капитала требует ресурсов, отработанные ресурсы (отходы) увеличивают загрязнение окружающей среды, загрязнение окружающей среды влияет на численность населения и производство продовольствия и т.д. Кроме того, каждый из этих факторов через некоторое время, обусловленное запаздыванием, начинает испытывать воздействие обратных связей. Чтобы учесть взаимосвязи между отдельными процессами, Д.Медоуз и его коллеги использовали методы системной динамики и компьютерного моделирования. Построенная модель имела своей целью показать, что произойдет в мире, если сохранятся существовавшие на тот момент тенденции роста численности населения, промышленного и сельскохозяйственного производства, нерационального использования невозобновимых природных ресурсов, загрязнения окружающей природной среды. Этот вариант развития событий авторы назвали "базовым сценарием". Кроме того, авторы рассмотрели еще 12 сценариев, учитывающих возможное изменение технологических, социальных или ресурсных характеристик, например, удвоение запасов невозобновимых природных ресурсов, наличие неисчерпаемого источника энергии, ограничение рождаемости, контроль загрязнений и т.д.

Результаты исследования были опубликованы в 1972 году в виде доклада "Пределы роста" [10]. Авторы работы пришли к выводу о том, что, если современные тенденции роста численности населения, производства промышленной продукции, продовольствия, истощения ресурсов, загрязнения окружающей природной среды не изменятся, то в течение следующего столетия мир подойдет к пределам роста, произойдет неожиданный

и неконтролируемый спад численности населения и резкое снижение объема производства (рис.3). Первичной причиной такого коллапса станет истощение запасов невозобновимых ресурсов, необходимых для производства промышленной продукции. Разрушение индустриальной базы повлияет на систему услуг и сельское хозяйство, что через некоторое время приведет к уменьшению численности населения из-за повышения смертности, вызванной загрязнением окружающей среды, нехваткой продовольствия и медицинских услуг.

Почти сорок лет спустя после публикации работы "Пределы роста" Дж.Тернер (G.Turner) провел сравнение реальных показателей ("экспериментальных данных") и параметров, предсказанных Д.Медоузом и его соавторами [11]. Сравнение показало совпадение наблюдаемых тенденций и "базового сценария", описанного в докладе, по целому ряду показателей, таких как общая численность населения, соотношение числа рождений и смертей, объем промышленного производства, потребление продовольственных товаров на душу населения, расходование ресурсов и загрязнение окружающей среды (рис.4). Таким образом, "эксперимент", который проводит человечество, с достаточной степенью точности совпадает со сценарием, описанным более 40 лет назад.

В 2009 году группа из 17 ученых под руководством Йохана Рокстрема (Johan Rockström) из Стокгольмского центра устойчивости и Уилла Стеффена (Will Steffen) из Австралийского национального университета ввела понятие планетарных границ, то есть критических параметров, выход за которые будет фатальным для биосферы из-за необратимых изменений окружающей среды [12, 13]. Всего было выделено девять планетарных границ, которые связаны с наземными экосистемами, гидросферой, атмосферой или биосферой в целом: изменение климата в результате увеличения концентрации CO₂ в атмосфере, разрушение озонового слоя, потеря биоразнообразия, закисление Мирового океана, истощение запасов пресной воды, использование новых земель под сельское хозяйство, биогеохимические циклы азота и фосфора, содержание аэрозолей в атмосфере и химическое загрязнение (табл.2, рис.5). При превышении планетарных границ биосфера Земли выходит из состояния устойчивости, и в этих условиях даже небольшое возмущение может стать причиной наступления непропорционально значительных изменений, нарушения внутренней структуры и организации системы. По оценкам авторов, сделанных ими в 2009 году, человечество уже вышло за пределы границ устойчивости по трем параметрам: уровень потери биоразнообразия, нарушение биогеохимического круговорота азота и изменение климата.

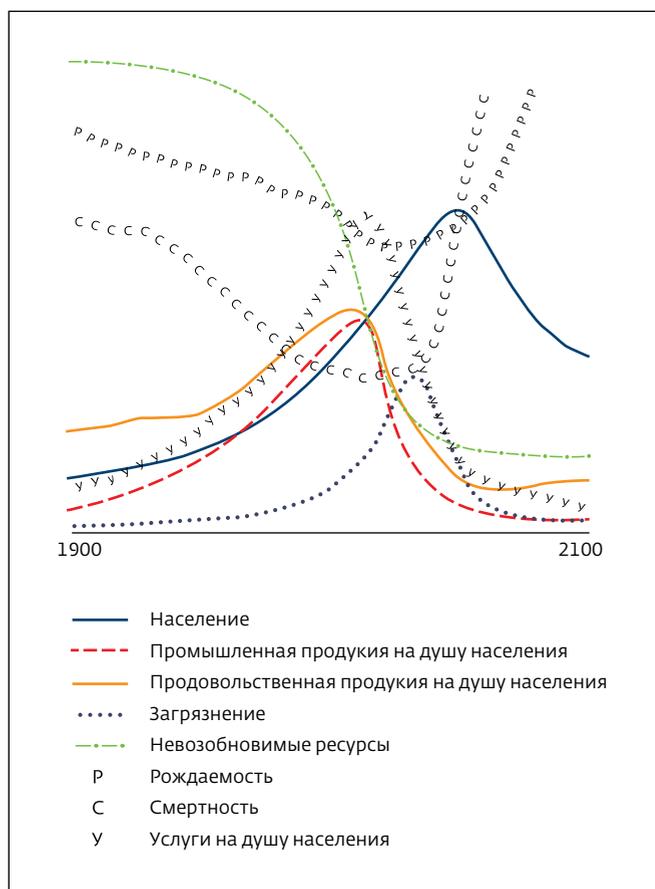


Рис.3. Изменение основных характеристик глобальной системы, согласно "базовой модели" [10]

Вымирание видов является естественным процессом, который происходит и без вмешательства человека. Однако скорость потери биоразнообразия, которая определяется числом вымерших видов на миллион видов в год, в постиндустриальный период значительно превышает скорость естественного вымирания. Как видно из табл.2, в доиндустриальный период эта величина составляла 0,1-1 единиц, а в настоящее время превышает 100 единиц при граничном значении безопасности 10 единиц. Деятельность человека, связанная с производством минеральных удобрений и выращиванием бобовых культур, привела к значительному превышению порога связывания атмосферного азота и загрязнению окружающей среды продуктами, содержащими азот в активной форме. Ежегодно человек связывает около 120 млн т азота, большая часть связанного азота в конечном итоге попадает в русла рек и прибрежную зону морей и океанов, воздействуя на экосистему Земли и вызывая исчезновение фитопланктона. Кроме того, образующаяся в результате человеческой деятельности закись азота (гемиксид азота) входит в число парниковых газов, увеличивая радиационный нагрев, то есть нарушая

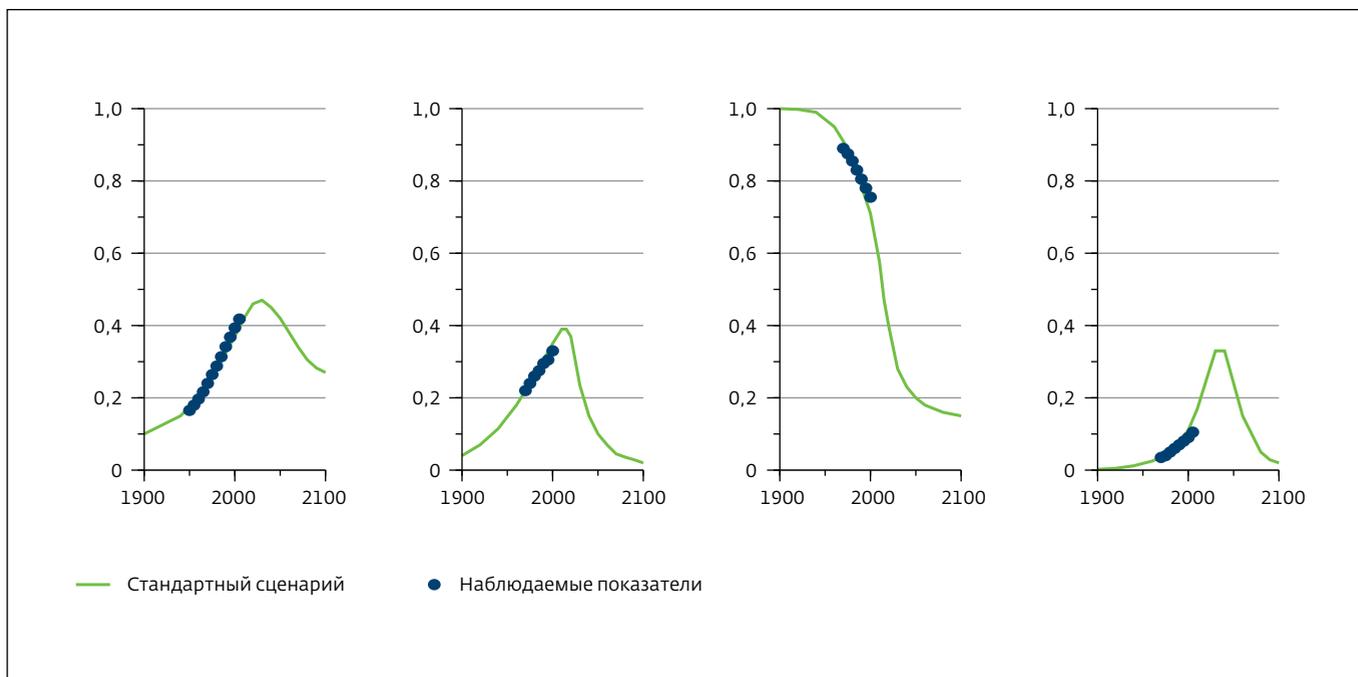


Рис.4. Сравнение параметров "базового сценария", предсказанного Д.Медоузом с соавторами, и наблюдаемых показателей (нормализованные показатели). а – население, б – промышленная продукция на душу населения, в – невозобновимые ресурсы, г – уровень загрязнения

баланс между приходящим солнечным излучением и исходящим от планеты инфракрасным (тепловым) излучением. Изменение климата определяется авторами величиной двух показателей: концентрацией углекислого газа в атмосфере и радиационным нагревом. По данным на 2015 год, эти показатели составляли 397 м.д. CO_2 (граница 350 м.д.) и $+2,3 \text{ Вт/м}^2$ (граница $+1 \text{ Вт/м}^2$) [13].

Крайне настораживающим моментом является то, что для двух параметров, таких как содержание аэрозолей в атмосфере и химическое загрязнение, не удалось определить планетарные границы устойчивости из-за чрезвычайно сложного характера взаимосвязи между этими и другими параметрами. Отсутствие количественной оценки означает, что ученые не в состоянии определить, где человечество находится в настоящее время и что происходит с химическими загрязнителями и с атмосферными аэрозолями.

Кроме планетарных границ, необходимых для обеспечения устойчивости биосистемы Земли, в работах других авторов был выделен ряд жизненно важных параметров, которые связаны с тем, что Homo Sapiens является не просто млекопитающим, но формирует особую общность – человеческую цивилизацию. У человека существуют потребности в том, чтобы его мнение (голос) было услышано, в получении образования, в чистой воде, в еде, в заботе о здоровье, в соблюдении гендерного ба-

ланса [14, 15]. Эти параметры также включаются в оценку устойчивости существования человеческого вида на планете. Таким образом, безопасное и справедливое пространство существования цивилизации можно изобразить в виде тора-"бублика" (doughnut), внешние контуры которого ограничены планетарными границами, связанными с природными факторами, а внутренние – социальными границами, связанными с понятиями о справедливом обществе и правах человека (рис.6).

КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

К концу 20 века в мире сложилась достаточно сложная ситуация, и Организацией Объединенных Наций был услышан призыв ученых обратить внимание на существование глобальных проблем. Основные этапы процесса становления концепции устойчивого развития (sustainable development) представлены ниже:

1972 год – публикация доклада Римскому клубу "Пределы роста";

1972 год – Первая Всемирная конференция ООН по окружающей среде, Стокгольм;

1983 год – создание Комиссии ООН по окружающей среде и развитию;

1987 год – публикация доклада Комиссии ООН по окружающей среде и развитию "Наше общее будущее";

Таблица 2. Планетарные границы устойчивости биосистемы Земли

Процессы, происходящие в системе Земли	Параметры	Предлагаемая граница	Текущее значение	Значение в доиндустриальный период
Изменение климата	Концентрация углекислого газа в атмосфере (количество частей на миллион по объему)	350	387	280
Изменение климата	Изменение радиационного нагрева (Вт на кв. м)	1	1,5	0
Скорость уменьшения биоразнообразия	Скорость вымирания (число особей на миллион особей в год)	10	>100	0,1-1
Азотный цикл	Количество азота, выведенного из атмосферы благодаря человеку (млн тонн в год)	35	121	0
Фосфорный цикл	Количество фосфора, поступающего в океан (млн тонн в год)	11	8,5-9,5	1
Истощение озона в стратосфере	Концентрация озона (количество единиц Добсона)	276	283	290
Закисление океана	Глобальный средний уровень насыщения арагонитом в поверхностном слое морей	2,75	2,90	3,44
Использование пресной воды	Потребление пресной воды человеком (км ³ в год)	4000	2600	415
Изменение экосистем суши	Процент земель, используемых под земледелие	15	11,7	Низкий
Количество аэрозоля в атмосфере	Общая концентрация твердых аэрозольных частиц в атмосфере	Не определено		
Химическое загрязнение	Например, поступившее в окружающую среду количество (или концентрация в окружающей среде) стойких органических загрязнителей, пластмасс, эндокринных деструкторов, тяжелых металлов и радиоактивных отходов или воздействие на экосистему	Не определено		

1992 год – Всемирная Конференция ООН по проблемам окружающей среды и развития, Рио-де-Жанейро, Саммит Земли. Принята "Повестка дня на 21 век";

2002 год – Всемирный саммит по проблемам устойчивого развития, Йоханнесбург. Приняты "План действий" и "Политическая декларация";

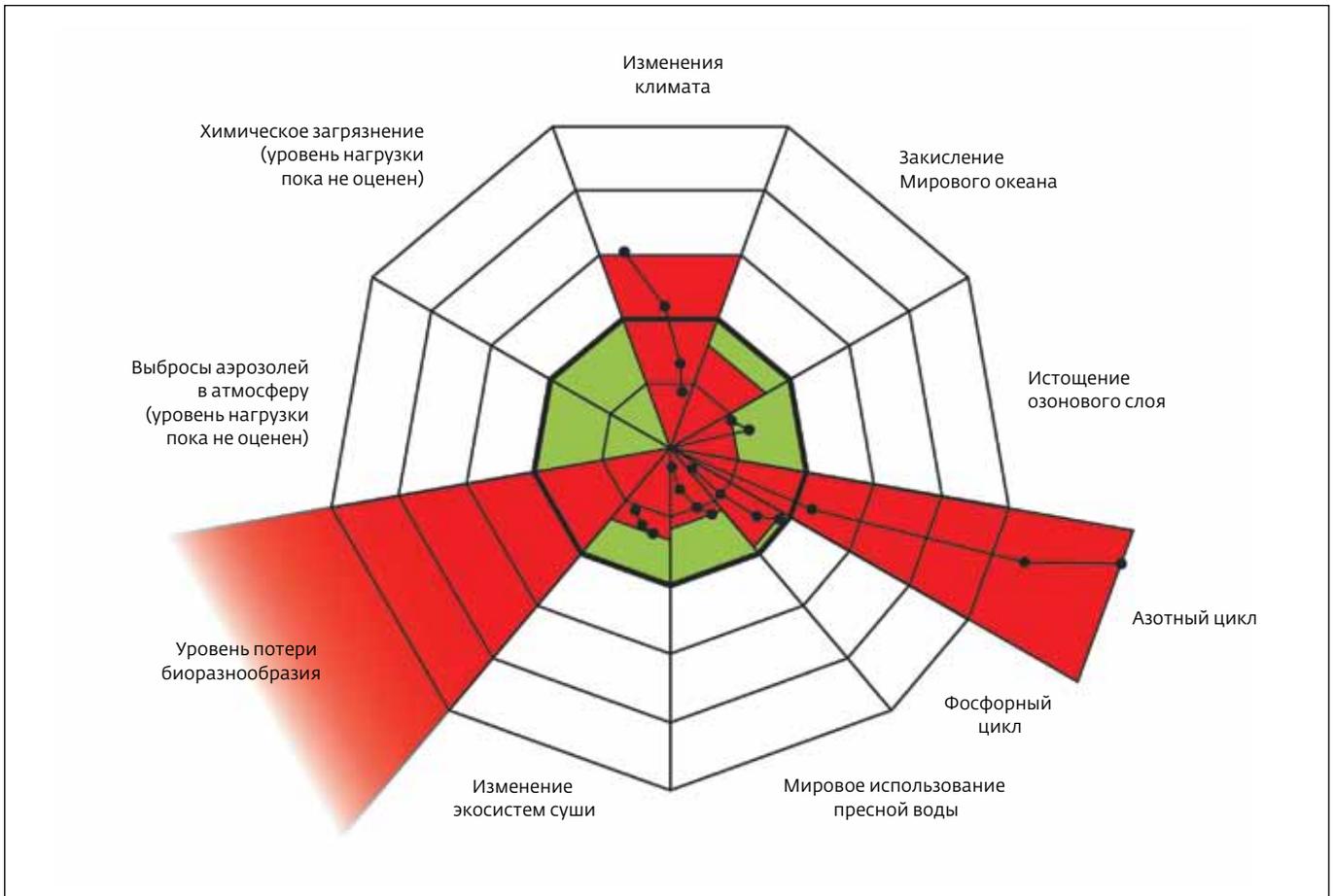


Рис.5. Планетарные границы устойчивости биосистемы Земли

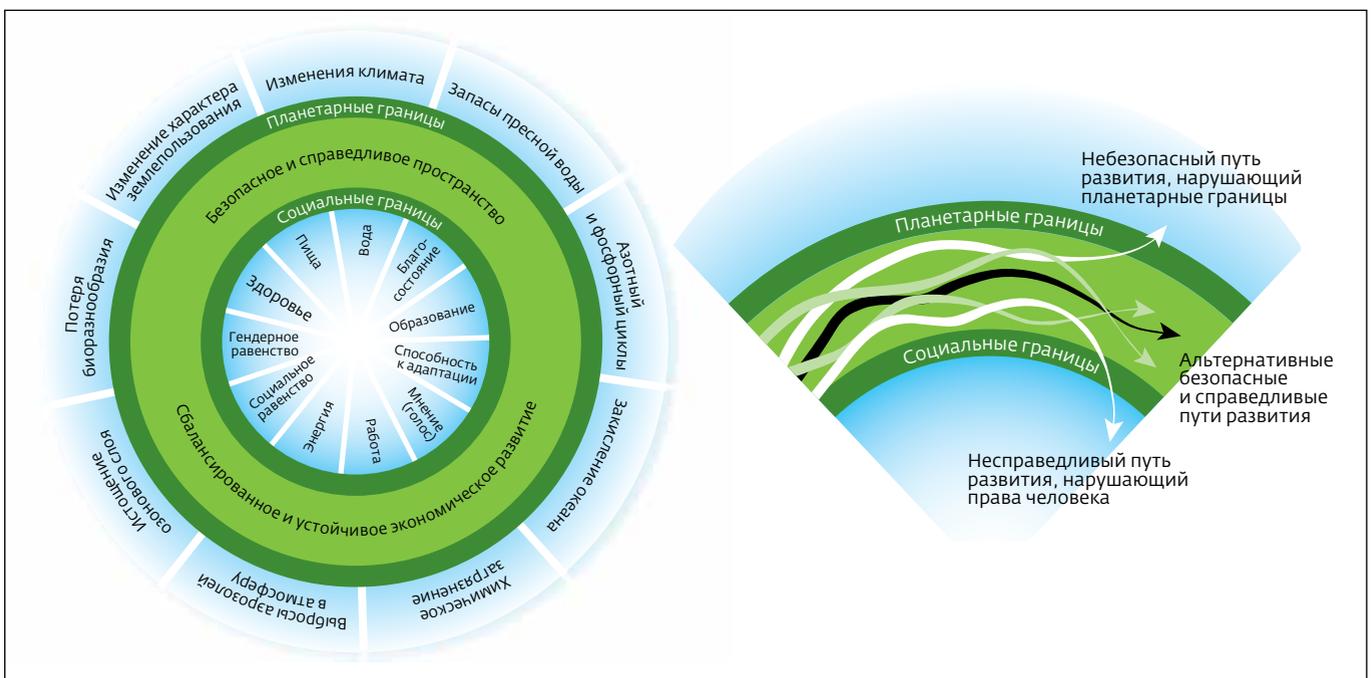


Рис.6. а – Границы безопасного и справедливого пространства человека; б – пути развития в рамках границ безопасного и справедливого пространства

2005–2014 годы – Декада образования для устойчивого развития (ООН);

2005 год – принята Стратегия образования для устойчивого развития (ЕЭК);

2011 год – Международный год химии. Девиз: "Химия – наша жизнь, наше будущее!";

2012 год – Всемирный саммит Rio+20;

2015 год – Приняты "Цели устойчивого развития ООН".

Устойчивое развитие – это развитие, при котором удовлетворение потребностей нынешних поколений осуществляется без ущерба для возможностей будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Эта базовая формулировка впервые появилась в 1987 году в докладе "Наше общее будущее". Его подготовила Комиссия ООН по окружающей среде и развитию, которую часто также называли Комиссией Брундтланд по имени ее руководителя – Гру Харлем Брундтланд, политического и общественного деятеля из Норвегии, которая внесла огромный вклад в продвижение концепции устойчивого развития и в международное сотрудничество в целях его достижения. Именно в формулировке Комиссии Брундтланд содержится ключевая идея устойчивого развития – рассмотрение его как баланса потребностей поколений.

3–14 июня 1992 года в Рио-де-Жанейро (Бразилия) состоялась Конференция ООН по окружающей среде и развитию. На встрече была принята декларация, которая гласила, что "для достижения устойчивого развития защита окружающей среды должна составлять неотъемлемую часть процесса развития и не может рассматриваться в отрыве от него".

Выпускник Менделеевского университета (ранее МХТИ имени Д.И.Менделеева) президент ИЮПАК в 1987–1989 году академик Валентин Афанасьевич Коптюг входивший в состав делегации Российской Федерации на конференции ООН, внес огромный вклад в продвижение идей устойчивого развития в нашей стране и в мировом химическом сообществе. В 1989 году бюро ИЮПАК одобрило предложенную им программу "Химия и окружающая среда", в рамках которой были сформулировано шесть задач, стоящих перед химией [16]: 1) определение следовых количеств химических веществ; 2) определение основных физико-химических характеристик окружающей среды; 3) изучение сложных путей превращения химических веществ в природе; 4) токсикология природных и синтетических продуктов питания; 5) предупреждение загрязнения окружающей среды; 6) химическая безопасность. Благодаря В.А.Коптюгу, в ИЮПАК появился ряд структур, которые работают в тех направлениях химических технологий, достижения которых особенно важны

Устойчивое развитие

- Мир человека и природы, мир человека в природе характеризуется устойчивостью, способностью к самоподдержанию и отсутствием кризисов антропогенного происхождения.
- Человек зависит от Земли и ее ресурсов и не рискует превышать ограничения поддерживающей емкости ее систем, налагаемые конечностью Земли и земной биосферы, ее живых и неживых составляющих, подвергая опасности сам факт существования жизни на Земле.
- Человечество стремится к удовлетворению своих потребностей и в то же время не ставит под угрозу способность будущих поколений выживать и удовлетворять их собственные потребности; человечество заботится о сохранении биоразнообразия на Земле, так как все живое имеет право на жизнь, сейчас и в будущем.
- Стратегия устойчивого развития не может быть определена на основе только традиционных представлений и ценностей. Она предполагает выработку новых научных подходов, отражающих как современные реалии, так и перспективы развития

для человечества, а программа устойчивого развития стоит на первом месте среди целей этой организации. В 1993 году В.А.Коптюг основал журнал "Химия в интересах устойчивого развития", являющийся единственным научным периодическим изданием по устойчивому развитию в России.

25 сентября 2015 года Генеральная Ассамблея ООН приняла "Цели устойчивого развития", представленные на рис.8 [17]. Большинство из них содержат компоненты, так или иначе связанные с химией, химической технологией, контролем за состоянием окружающей среды, промышленной продукцией и здоровья человека: обеспечение чистой водой и чистыми продуктами питания, контроль за состоянием городов, получение чистой энергии, разработка рациональных моделей потребления и производства, и, наконец, проблемы изменения климата.

Так, формулировка цели № 2 включает "ликвидацию голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания". Учитывая, что, по прогнозам, население Земли достигнет к 2050 году девяти



Рис.7. "Цели устойчивого развития", принятые Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 года

миллиардов, производство продуктов питания должно возрасти на 60% по сравнению с 2007 годом. Помимо внедрения новых минеральных удобрений, химическая промышленность помогает в решении этого вопроса созданием ферментов, продлевающих срок годности хлебобулочной продукции (Dupont), разработкой способов витаминизации продуктов, таких

как рис и пшеница (AkzoNobel, DSM and BASF), разработкой и внедрением комплекса ферразон (Ferrazone, AkzoNobel) для профилактики железодефицитной анемии и т.д. Достижение цели № 3 – "хорошее здоровье и благополучие" – невозможно без разработки химиками новых лекарственных средств, средств диагностики, а также препаратов, защищающих от насекомых,

паразитов и грызунов, переносящих заболевания. Целью № 6 заявлено "обеспечение наличия и рациональное использование водных ресурсов". Хотя вода покрывает 70% площади нашей планеты, менее 1% этого ресурса может быть использовано для питья и приготовления пищи. Химическая промышленность разрабатывает новые технологические решения с использованием передовых материалов, биореакторов и нанотехнологий для очистки воды с целью ее повторного использования и уменьшения потребления энергии. Переход от использования ископаемого топлива к современным возобновляемым источникам энергии позволит решить задачу № 7. Для создания новых источников энергии требуются новые материалы, разработкой которых занимается химия. Новые материалы позволяют также существенно снизить энергопотери, одновременно способствуя улучшению качества городских построек и общественного транспорта (цель № 11). Так, оконное пленочное покрытие EnerLogic® (Eastman) увеличивает изолирующую способность окна на 92%, позволяя экономить энергию как на обогреве помещения, так и на его кондиционировании. Использование легкого углеродного волокна при производстве самолетов уменьшает расход топлива на 30%, не снижая при этом безопасности. Для обеспечения рациональной модели потребления и производства (цель № 12) решаются задачи по вторичному использованию материалов. Например, завод по переработке покрышек (г. Новокузнецк) осуществляет переработку более 14 тыс. т отработанных шин различных габаритов в резиновые коврики для напольных покрытий, а компанией VinylPlus в 2016 году было переработано 568696 т отходов производства ПВХ (+10,4% по сравнению с 2015 годом).

ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ

В 90-х годах прошлого столетия в химии возникло новое научное направление – зеленая химия – призванное сделать химические производства и продукты максимально безопасными для человека и окружающей среды. Среди задач этого направления – поиск альтернативы опасным веществам, используемым в качестве исходных материалов, разработка химических процессов, снижающих количество отходов и используемых невозобновимых ресурсов, потребление меньшего количества энергии.

Двенадцать основных принципов зеленой химии были сформулированы в 1998 году П.Т.Анастасом и Дж.С.Уорнером в книге "Зеленая химия: теория и практика" [18]:

1. Упреждение. Лучше не допускать образования отходов, чем заниматься их переработкой или уничтожением.
2. Экономия атомов. Методы синтеза должны разрабатываться таким образом, чтобы в состав конечного продукта включалось как можно больше атомов реагентов, использованных в ходе синтеза.
3. Снижение опасности процессов и продуктов синтеза. Во всех практически возможных случаях следует стремиться к использованию или синтезу веществ, нетоксичных или мало токсичных для человека и окружающей среды.
4. Конструирование "зеленых" материалов. Технологии должны обеспечивать создание новых материалов, обладающих наилучшими функциональными характеристиками и наименьшей токсичностью.
5. Использование менее опасных вспомогательных реагентов. Использование вспомогательных реагентов (растворителей, экстрагентов и т.д.) в процессах синтеза следует по возможности избегать. Если это невозможно, ключевым является параметр токсичности.
6. Энергосбережение. Следует представлять экологические и экономические последствия, связанные с затратами энергии в химических процессах. Желательно осуществлять процессы синтеза при комнатной температуре и атмосферном давлении.
7. Использование возобновимого сырья. Во всех случаях, когда это технически возможно и экономически допустимо, следует отдавать предпочтение возобновимому сырью.
8. Уменьшение числа промежуточных стадий. Следует минимизировать или вообще отказаться от ненужных промежуточных производных (блокирующие группы, протекторы, промежуточные модификаторы физических и химических процессов), поскольку промежуточные стадии сопряжены с генерацией дополнительных отходов и с потреблением реагентов.
9. Использование каталитических процессов. Каталитические процессы (с возможно большей селективностью) предпочтительнее по сравнению со стехиометрическими реакциями.
10. Биоразлагаемость. Химический дизайн продуктов должен обеспечивать их легкую деградацию в конце жизненного цикла, не приводящую к образованию соединений, опасных для окружающей природной среды.
11. Обеспечение аналитического контроля в реальном масштабе времени. Для предотвращения образования опасных отходов следует развивать аналитические методы, обеспечивающие возможность мониторинга и контроля в реальном времени.
12. Предотвращение возможности аварий. Химические соединения, используемые в технологических процессах, должны присутствовать в формах, минимизирующих вероятность химических аварий (выбросов СДЯВ, взрывов, пожаров).

В настоящее время зеленая химия развивается преимущественно в следующих направлениях: экономия атомов, новые схемы синтеза, в частности, применение новых катализаторов, использование возобновимых источников сырья вместо реагентов, полученных из нефти, и замена традиционных органических растворителей на более экологически безопасные, в частности, на сверхкритические растворители.

Соблюдение принципов зеленой химии должно позволить поддерживать экономическое развитие с целью предоставления доступных товаров и услуг растущему населению мира, сохраняя при этом окружающую среду. Снижение затрат на производство достигается отсутствием стадии уничтожения и переработки токсичных побочных продуктов, уменьшением общего числа стадий и снижением энергозатрат в результате использования катализаторов [19].

ВЫВОДЫ

Таким образом, роль химии в достижении "Целей устойчивого развития" чрезвычайно важна и разнообразна, и включает такие аспекты [20], как:

- познавательная химия, связанная с просвещением, образованием, формированием мировоззрения;
- производственная химия, связанная с разработкой технологических процессов;
- экологическая химия, включающая химию окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов;
- химический мониторинг, включающий в анализ химического состава и состояния всех компонент устойчивого сообщества: экосферы, техносферы и этносферы;
- ресурсосберегающая химия, включающая энергосбережение, сбережение материалов и переработку отходов и выбросов;
- химия жизни, направленная на химическое, биохимическое понимание строения и функционирования живых объектов;
- химия для человека, включающая создание лекарственных средств, разработка технологий получения и очистки пресной воды, пищевую химию и бытовую химию.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Karmin M., Saag L., Vicente M., et al** A recent bottleneck of Y chromosome diversity coincides with a global change in culture // *Genome Res.* 2015, 25(4): 459. doi: 10.1101/gr.186684.114
2. **Шкловский И.С.** Вселенная, жизнь, разум // М.: Наука, 1987. 320 с.
3. **Mora C., Tittensor D.P., Adl S., Simpson A.G.B., Worm B.** How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? // *PLoS Biol* 2011, 9(8): e1001127. doi:10.1371/journal.pbio.1001127
4. **Pietsch Th.W.** *Trees of Life: A Visual History of Evolution* // Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2012. 358 p. ISBN 13: 978-1-4214-0479-0
5. **Damuth J.** Population density and body size in mammals // *Nature*, 1981, 290, 699.
6. **Капица С.П.** *Общая Теория Роста Человечества* // М.: Наука, 1999.
7. **Горшков В.Г.** *Физические и биологические основы устойчивости жизни* // М.: ВИНТИ, 1995. 470 с.
8. **Вернадский В.И.** *Научная мысль как планетное явление* // М.: Наука, 1991. 271 с.
9. **Steffen W., Grinevald J., Crutzen P. and McNeill J.** The Anthropocene: conceptual and historical perspectives // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2011 369, 842. doi: 10.1098/rsta.2010.0327
10. **Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L., Behrens W.W.** *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind* // Universe Books, 1972. 211 p. ISBN 0876631650
11. **Turner G.M.** A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality // *Global Environmental Change.* 2008. 18 (3): 397.
12. **Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson A. et al.** A safe operating space for humanity // *Nature.* 2009. 461. 472.
13. **Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E. et al.** Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet // *Science.* 2015. 347. 6223. 1259855 DOI: 10.1126/science.1259855
14. **Raworth K.** A safe and just space for humanity CAN WE LIVE WITHIN THE DOUGHNUT? // *Oxfam Discussion Paper.* February 2012.
15. **Dearing J.A., Wang R., Zhang K., Dyke J.G. et al.** Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems // *Global Environmental Change.* 2014. 28. 227.
16. **Мясоедов Б.Ф., Трутнева Я.М., Коптюг В.А.** В международном союзе по теоретической и прикладной химии: Памяти Валентина Афанасьевича Коптюга // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. С. 16–21.
17. **SUSTAINABLE DEVELOPMENT: KNOWLEDGE PLATFORM** <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>
18. **Anastas P.T., Warner J.C.** *Green Chemistry: Theory and Practice* // Oxford University Press, New York, 1998. 30 p.
19. **Tarasova N.P., Makarova A.S., Varlamova S.N., Vavilov S.Y.** The development of Green Chemistry in Russia as a tool to improve the competitiveness of chemical products [an opinion poll] // *Journal of Cleaner Production.* 2014. 83. 491.
20. **Бузник В.М.** В. А. Коптюг о роли химии в устойчивом развитии общества // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2001. 9. 315.