

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА –
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЯЗЫК ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ”

ЗЕЛЁНАЯ ХИМИЯ И ХЕМОФОБИЯ

© 2020 г. Н. П. Тарасова^{a,b,*}, А. С. Макарова^{a, **}

^a Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

^b Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*E-mail: tarasnp@muctr.ru

**E-mail: annmakarova@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2019 г.

После доработки 09.01.2020 г.

Принята к публикации 20.01.2020 г.

Проблема хемофобии обусловлена всё возрастающей химической нагрузкой на окружающую среду, с одной стороны, и недостаточным уровнем химической грамотности населения – с другой. В статье, подготовленной по материалам доклада на научной сессии Общего собрания членов РАН 14 ноября 2019 г., приводятся данные социологических исследований, раскрывающие отношение к химии в различных странах. Эффективным средством преодоления хемофобии и её разновидности – агрохемофобии может стать зелёная химия. Это не новое неизвестное ранее направление. Скорее, компактная формулировка принципов мышления хорошо подготовленного и социально ответственного химика – учёного или технолога. Последний тезис подтверждается активным практическим использованием подходов зелёной химии промышленностью, в том числе российской. Однако не только бизнес-сообщество, но и политики самого высокого уровня стараются придерживаться этого способа мышления. Организацией Объединённых Наций отмечено, что зелёная химия – ключевое направление развития науки.

Ключевые слова: Периодическая таблица химических элементов, планетарные границы, хемофобия, зелёная химия, химические вещества, химическая грамотность.

DOI: 10.31857/S0869587320040131

Организация Объединённых Наций провозгласила 2019 год Международным годом Периодической таблицы химических элементов, подчёркивая,



ТАРАСОВА Наталия Павловна – член-корреспондент РАН, заведующая кафедрой ЮНЕСКО “Зелёная химия для устойчивого развития” РХТУ им. Д.И. Менделеева. МАКАРОВА Анна Сергеевна – доктор технических наук, доцент кафедры ЮНЕСКО “Зелёная химия для устойчивого развития” РХТУ им. Д.И. Менделеева.

что ровно 150 лет назад, в 1869 г., великий русский учёный Дмитрий Иванович Менделеев опубликовал свою первую схему Периодической таблицы в журнале Русского химического общества [1]. Периодический закон Д.И. Менделеева, как и его графическая иллюстрация – Периодическая таблица химических элементов, расширил границы химии, прочно соединив все естественнонаучные, точные и гуманитарные представления о нашем меняющемся мире в единую целостную систему, указав направление движения научного познания. Всеобщий характер периодических процессов в природе открывает безграничные возможности их использования для изучения физических, биологических, астрономических проблем, эффективного решения задачи интеграции естественнонаучных знаний.

Мероприятия в рамках Международного года Периодической таблицы химических элементов значительно оживили интерес к химии, показав её значение для современного общества, и ярко продемонстрировали роль фундаментальной нау-

ки и естественнонаучного образования в достижении Целей устойчивого развития. Дома, одежда, пища, лекарства, да и сами люди существуют благодаря сложной совокупности химических превращений. Цемент и бетон — это химия, отбеливание и окрашивание тканей, даже натуральных, — это тоже химия, при росте любого растения протекают сложные процессы образования и деградации химических веществ, жизнь как таковая — цепь биохимических реакций. Естественно, у каждого разумного человека возникает вопрос: “Как можно не любить химию, если химия — это то, что представляет собой наш мир и мы сами?”. Тем не менее хемофобия — объективная реальность, и никакие мероприятия, которых было особенно много в Международный год Периодической таблицы химических элементов (они прошли в Конгрессе США, Европейском парламенте, во Франции, провозгласившей 2019-й годом химии, в нашей стране, где День российский науки проводился под знаком химии), не могут преодолеть эти страхи. Так что же такое хемофобия? Какие объективные причины способствовали её возникновению?

По нашему мнению, хемофобия (иррациональная боязнь химических соединений) связана с особенностями развития человеческой цивилизации, её прогрессом, при котором деятельность человека (в том числе направленная на совершенствование химической промышленности) стала оказывать значимое влияние на окружающий мир [2]. Современная эпоха даже получила новое название — антропоцен [3]. По различным оценкам, человек разумный появился на Земле около 70–100 тыс. лет назад. За это время из существа, приспособившегося к природным условиям, он превратился в мощную преобразующую силу, оказывающую давление на процессы в окружающей среде. Начавшаяся в XVIII в. промышленная революция, которая заключалась в массовом переходе от аграрного общества к индустриальному, сопровождалась урбанизацией и демографическими изменениями. Человек развернул масштабную деятельность, при этом остро встал вопрос о его влиянии на состояние биосферы и судьбу планеты. По образному выражению В.И. Вернадского, “человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой”. Это привело прежде всего к экспоненциальному росту численности народонаселения и, как следствие, к изменениям в окружающей среде: увеличению концентрации CO₂, уменьшению биоразнообразия, нарушению циклов биогенных элементов — азота и фосфора. Повышая урожайность сельскохозяйственных культур, защищая их от вредителей, получая новые материалы и продукты, развивая транспорт, создавая медикаменты, человечество наносило непреднамеренный вред планете. В связи с этим в 1960–1970-

е годы стали появляться научные работы, посвящённые исчерпаемости природных ресурсов и отрицательному влиянию человеческой деятельности на окружающую среду. По данным некоммерческих организаций Всемирный экологический след (Global Footprint Network) и Всемирный фонд дикой природы (World Wildlife Fund), на протяжении более чем 40 лет, начиная с 1970 г., потребление природных ресурсов превышало способность нашей планеты к их воспроизводству. Это породило дефицит биоёмкости — возможности экосистем Земли производить определённые биологические материалы и утилизировать отходы антропогенной деятельности. По оценкам экологов, в 2018 г. потребности человечества превосходили возможности природы в 1.5 раза. В 2019 г. ресурсы Земли, рассчитанные на год, были исчерпаны 29 июля. При сохранении данной тенденции для удовлетворения потребностей человечества к 2050 г. потребуется уже три планеты Земля.

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. В научный обиход вошло понятие “планетарные границы” [4]. Это направление активно развивается последние 10 лет. Описано девять планетарных границ, в том числе изменение климата, потеря биоразнообразия, изменение экосистем суши [5]. Для большинства границ были установлены численные значения. Однако все попытки количественно определить пределы химического загрязнения и содержания аэрозолей в атмосфере пока результатов не дали [6]. Не удаётся вычислить, какое количество загрязняющих веществ может привести к необратимым изменениям в биосфере, какова судьба аэрозолей и каков предел их содержания в атмосфере, безопасный для планеты. Эту неопределённость, по нашему мнению, можно рассматривать как одну из причин расцвета хемофобии.

В марте 2019 г. на 4-й сессии Ассамблеи ООН по окружающей среде в Найроби был представлен отчёт “Глобальная перспектива в области химических веществ — II: от устаревших методов к инновационным решениям”, основной вывод которого звучал так: “Глобальная цель по сведению к минимуму неблагоприятного воздействия химических веществ и отходов не будет достигнута к 2020 году. Эта задача может быть решена, но для этого требуются безотлагательные и более масштабные действия всех заинтересованных сторон по всему миру” [7].

Отметим, что в 2018 г. в мировом торговом обороте находилось от 40000 до 60000 промыш-



Рис. 1. Результаты опроса в Великобритании (выборка 2104 респондентов) [10]

ленных химических веществ, причём на долю 6000 из них приходилось более 99% от общего объёма мирового рынка. Согласно данным Европейского агентства по окружающей среде за 2018 г., около 62% от общего объёма химических веществ, потреблённых в Европе в 2016 г., представляли опасность для здоровья. С 2000 по 2017 г. мировой производственный потенциал химической промышленности (за исключением фармацевтических препаратов) вырос почти в 2 раза — примерно с 1.2 до 2.3 млрд т. С учётом лекарственных средств совокупный объём продаж в 2017 г. составил 5.68 трлн долл. США, что ставит химическую промышленность на второе место в мире среди обрабатывающих отраслей. Согласно прогнозам, с 2017 по 2030 г. данный показатель практически удвоится. При этом темпы роста производства и оборота химических веществ почти в 3 раза опережают темпы роста численности населения планеты.

Таким образом, с одной стороны, мы наблюдаем ускоренное развитие за счёт огромного массива знаний, приобретённых человечеством, и достижений науки, в том числе химии, а с другой — экспоненциально возрастающее количество потенциально опасных для человека и окружающей среды химических веществ. В 2018 г. ВОЗ измерила бремя болезни — годы жизни, утраченные в результате преждевременной смерти и нетрудоспособности (Disability-adjusted life year — DALY). Выяснилось, что в 2016 г. примерно 1.6 млн человеческих жизней и около 45 млн лет жизни с поправкой на инвалидность можно было сохранить благодаря рациональному регулированию и сокращению присутствия опасных химических веществ в окружающей среде [8]. Причинами нетрудоспособности стали хронические болезни почек и врождённые дефекты развития (1.9%), отравления (5%), причинение вреда, например, под действием химических веществ, вызывающих заторможенность и/или наркозоподобные состояния (10.7%), онкологические заболевания (19.8%), хронические обструктивные заболевания лёгких (26.7%), пневмокониоз (1.4%), сердеч-

но-сосудистые заболевания (32.7%). Из этого следует, что химия и химические технологии, влияющие на развитие современной цивилизации, могут представлять серьёзную опасность для человека и окружающей среды, если вспомнить о планетарных границах. В результате возникает своеобразная дихотомия: с одной стороны, химия — это наша жизнь и наше будущее, с другой — причина обоснованных опасений жителей планеты (хемофобия).

Определить уровень хемофобии можно, опираясь на данные социологических исследований. Однако их результаты различаются от страны к стране, поскольку в значительной степени сам предмет изучения сильно зависит от освещения в СМИ, системы образования и других особенностей конкретного государства. Явно выраженное отрицательное отношение к химии — в Швеции (около 80% населения высказываются негативно), сходная ситуация во Франции [9]. В Великобритании преобладает нейтральное отношение к химии и химической технологии [10]. Более того, её население зачастую воспринимает химию позитивнее, чем сами учёные. Например, 59% жителей считают, что она приносит скорее благо, чем вред, в то время как всего 55% учёных придерживаются такого мнения [9]. Причину можно понять, обратившись к результатам социологического опроса (рис. 1).

В основном отношение к химии формирует школа, поэтому важное значение имеет содержание школьных программ и учебников. В Великобритании, например, в 1990-х годах ведущие учёные Йоркского университета под руководством профессора Дэвида Уоддингтона написали великолепный учебник — “Солтерсовская химия”, в котором предмет показан во взаимосвязи с природой, человеком, культурой и медициной. В США в 1980-х годах по инициативе Американского химического общества появился учебник “Химия и общество”. Оба пособия переведены на русский язык при активном участии РХТУ им. Д.И. Менделеева и изданы достаточно боль-

шими тиражами. Однако российские образовательные реформы остановили их распространение в школах.

Недостаточная химическая грамотность ведёт к хемофобии, и ряд красноречивых примеров подтверждают этот тезис.

В конце 1990-х появился электронный ресурс, быстро набравший популярность¹. Он содержал обширную информацию о веществе под названием “дигидроген монооксид”, также известном как гидроксильная кислота. На сайте сообщалось, что это химическое соединение является компонентом кислотных дождей, способствует парниковому эффекту, ускоряет коррозию многих металлов. Его пары могут вызвать серьёзные ожоги. Вещество обнаружено во всех опухолях, удалённых у пациентов с терминальной стадией рака.

Узнав о столь опасном химическом соединении, многие политические и общественные деятели разных стран пытались запретить его распространение. В 2001 г. сотрудник новозеландского офиса Партии зелёных Сью Кедгли заявила, что она “полностью поддерживает кампанию по запрещению этого токсичного вещества” [11]. В марте 2004 г. в г. Алисо Вьехо, штат Калифорния, местные власти выступили с инициативой не использовать пластик во время массовых городских мероприятий, потому что дигидроген монооксид — компонент его производства. Помощник судьи попросил включить данный вопрос в повестку дня заседания Городского совета. Позже это обращение объяснили “плохим исследованием” [12]. В феврале 2011 г. в преддверии парламентских выборов в Финляндии кандидаты рассуждали, следует ли ограничить доступность “водородной кислоты, также известной как дигидроген монооксид”. В пользу ограничения высказались 49% кандидатов [13].

Между тем дигидроген монооксид — это всего лишь нетривиальное название воды, H_2O , и приведённые о соединении данные правильны. Действительно, вода есть в опухолях, горячая вода вызывает ожоги и т.д. Проблема заключается в химической грамотности людей, получивших доступ к данной информации.

Другой пример недостаточной химической грамотности — приверженность лозунгу “Всё природное — хорошо!”. Однако природное — не значит без химии и химических веществ и, следовательно, безопасно. Так, природное вещество асбест — причина многих случаев раковых лёгочных заболеваний — внесено в Стокгольмскую конвенцию по стойким органическим загрязнителям. Самые опасные в мире яды имеют природное происхождение, многие вещества, содержащиеся в цветах и определяющие

их запах, — аллергены. Проблема опасности/безопасности химии — не в природных и/или синтезированных человеком веществах, а в ответственности человека разумного за всё, что делает наше сообщество, включая осознанное и регулируемое обращение химических веществ. Часто учёные сначала синтезируют новое вещество, создают технологии, установки, производят продукцию, а потом общество (в том числе его академическая часть) начинает кампанию по запрету или ограничению его использования, тратя на борьбу драгоценные человеческие ресурсы. Примеров великое множество: озоноразрушающие вещества, полихлорированные (а теперь и полибромированные) бифенилы, перфторсоединения. Или новый вызов человечеству — так называемый микропластик. Уже установлено, что микропластики пластика весьма опасны и обнаруживаются практически везде, включая внутреннюю среду человека [14].

Рассмотрим другое явление — агрохемофобию, которая является разновидностью хемофобии. Если вернуться к планетарным границам, то одна из них напрямую связана с биогенными элементами — фосфором и азотом. Но фосфор, азот и калий — основные составляющие минеральных удобрений, на долю которых в мире и в Российской Федерации приходится большой процент от всей производимой химической продукции. В настоящее время отрасль ощущает значительное давление со стороны средств массовой информации и экологических организаций, ставящих вопрос об ограничении использования удобрений и других химикатов в сельском хозяйстве. Однако без химии в современном мире невозможно прокормить и одеть более 7.7 млрд человек. Мы не можем отказаться от удобрений, но способны использовать их разумно. В июне 2019 г. Международная ассоциация производителей удобрений приняла специальный Кодекс поведения, который предписывает учитывать воздействие удобрений на окружающую среду.

Необходимо отметить, что планетарные границы для биогенных элементов рассчитываются не в целом по планете, а по регионам, для которых составляют так называемые карты фосфорной и/или азотной нагрузки. На большинстве карт, появляющихся в публикациях, Россия выглядит как “серая” зона [15] с недостаточно достоверной информацией. Научно обоснованный подход к применению достижений химии и химической технологии состоит в ликвидации таких зон. Это даст возможность оценить уровень риска негативного воздействия на окружающую среду и/или здоровье человека при использовании тех или иных химических веществ и принять обоснованные управленческие решения. Для Российской Федерации, где прошло соответствующее исследование, составлены карты фосфорной нагрузки по отдельным регионам [16]. Ориенти-

¹ <https://www.snopes.com/fact-check/dangers-dihydrogen-monoxide/>

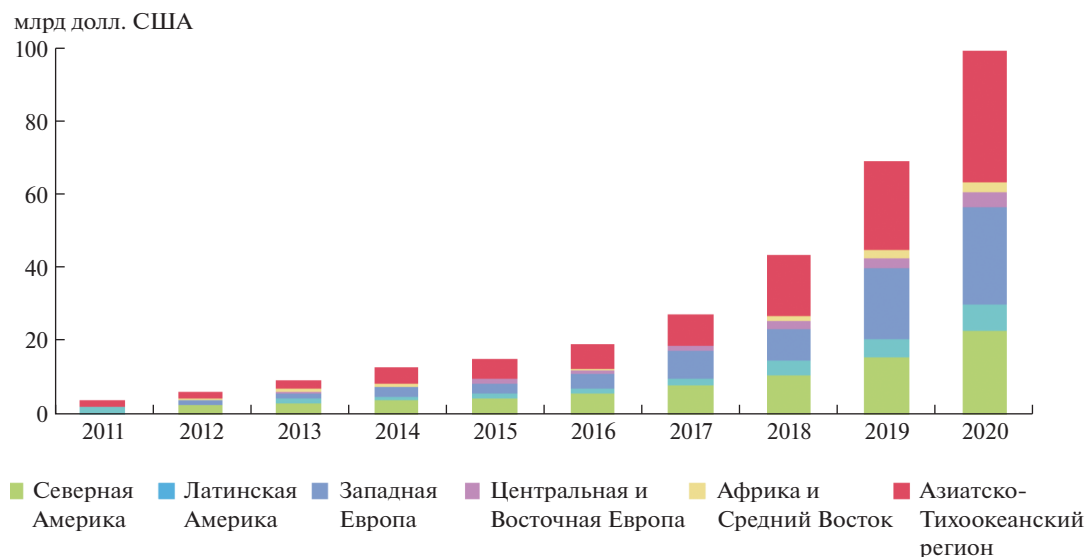


Рис. 2. Объёмы рыночной торговли зелёной химией, 2011–2020 гг. [21]

руясь на них, а также на данные по основным источникам поступления соединений фосфора [17], можно не только оценить риск достижения планетарной границы, но и управлять им.

Таким образом, главное сегодня – разъяснить общественности, политикам важность химической грамотности и суть глобальных процессов, в которые вовлечены используемые человечеством химические вещества, а также создавать их регулируемое производство и потребление. Эти положения отмечены в Целях устойчивого развития, принятых на Генеральной ассамблее ООН 25 сентября 2015 г. (раздел “Устойчивое производство и потребление”) [18].

Одним из инструментов успешного достижения этой цели стала зелёная химия [19]. Это своего рода лекарство от хемофобии, созданное химическим сообществом – учёными и представителями химической промышленности, осознавшими все опасности и вызовы, навязанные распространившимися страхами. Основой зелёной химии являются 12 принципов [20]. Их можно рассматривать как набор правил, позволяющих удовлетворить потребности современного общества в новых материалах, продуктах, процессах и системах без вреда для последующих поколений. Этим правилам всегда следуют хорошо подготовленные и экологически ответственные химики, учёные или технологи. Например, принцип № 2 гласит: “Рациональное (эффективное) использование исходных реагентов/атомная эффективность: методы синтеза должны разрабатываться таким образом, чтобы в состав конечного продукта включалось как можно больше атомов применяемых исходных реагентов”. Ещё в 1949 г. в СССР был внедрён кумольный способ синтеза фенола и

ацетона из бензола – пример процесса со 100%-ной атомной эффективностью. Технология разработана на кафедре Московского химико-технологического института, а её автор, Петр Гаврилович Сергеев, отмечен Сталинской премией. Принцип № 7 сформулирован так: “Использование возобновляемого сырья: во всех случаях, когда это технически возможно и экономически допустимо, следует отдавать предпочтение возобновляемому сырью”. В СССР в конце 1960-х годов появились первые в мире промышленные производства биотоплив из биомассы: биоводород, биометан, биобутанол, биоацетон и биоэтанол.

Сегодня зелёная химия востребована промышленностью, в том числе российской, что хорошо иллюстрируют данные по объёмам рыночной торговли 2011–2020 гг. [21] (рис. 2). В 2014 г. авторы статьи провели социологические исследования, которые показали, что до 80% российских предприятий внедряют или считают целесообразным внедрять принципы зелёной химии [22]. Отдельно отметим деятельность российской компании “ФосАгро” по развитию и продвижению идей зелёной химии. В рамках совместной программы ЮНЕСКО, “ФосАгро” и IUPAC “Зелёная химия для жизни” она выделила 2.5 млн долл. на распространение принципов зелёной химии среди молодых исследователей.

Созвучна с концепцией зелёной химии международная добровольная инициатива химической промышленности – программа “Ответственная работа”. Глобальные компании-лидеры, активно поддерживающие и продвигающие её, в свою очередь, интересуются и зелёной химией, что находит отражение в корпоративных отчётах. В Российской Федерации адаптацией и внедрением

программы занимается Российский союз химиков. Разработки, включая создание механизма по оценке экологической эффективности программы [23] и его практической реализации в формате конкурса “5 звезд. Лидеры химической промышленности”, получили признание европейских и международных организаций.

Однако не только бизнес-сообщество, но и политики самого высокого уровня поддерживают зелёную химию, названную ООН ключевым направлением развития науки. Так, профессор Ирина Бокова, выступая в 2017 г. на Петербургском международном экономическом форуме, сказала: “Зелёная химия нужна для учёта возможностей нашей планеты, стимулирования прогресса на пути к устойчивому развитию”.

Заметим, что хемофобия, как любая другая фобия, не может способствовать устойчивому развитию. Лекарство от этого “заболевания” – всеобщая химическая грамотность, формируемая со школьной скамьи, и ответственное обращение с химическими веществами, в том числе в быту. Для специалистов-химиков, выпускаемых высшими учебными заведениями, кодексом поведения должны стать принципы зелёной химии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д.И. Соотношение свойств с атомным весом элементов // Журнал Русского химического общества. 1869. № 1. С. 60–77.
2. Waters C.N., Zalasiewicz J., Summerhayes C. et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene // *Science*. 2016. V. 351. № 6269. P. 137.
3. Steffen W., Grinevald J., Crutzen P., McNeill J. The Anthropocene: Conceptual and historical perspectives // *Philos. Trans. R. Soc. London Ser.* 2011. V. 369. P. 842–867.
4. Rockstrom J., Steffen W., Noone K. et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity // *Ecology and Society*. 2009. V. 14. № 2 [online]. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
5. Rockstrom J., Steffen W., Noone K. et al. A safe operating space for humanity // *Nature*. 2009. V. 461. P. 472–475.
6. Тарасова Н.П., Макарова А.С. Оценка уровня химического загрязнения в контексте планетарных границ // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2016. № 5. С. 1383–1394.
7. UNEP/EA.4/21. Ассамблея Организации Объединённых Наций по окружающей среде Программы ООН по окружающей среде. Найроби, 11–15 марта 2019 г.
8. World Health Organization (2018). The Public Health Impact of Chemicals: Knowns and Unknowns – Data Addendum for 2016. <http://www.who.int/ipcs/publications/chemicals-public-health-impact/en/>
9. Moreau N.J. Public Images of Chemistry // *Chemistry International*. 2005. V. 27. № 4. P. 6–9.
10. Edwards J., Ceci C., Ratcliffe E. What the Public Really Thinks About Chemistry // *Chemistry International*. 2016. V. 38. № (3–4). P. 16–19.
11. Megan G. MP tries to ban water // *New Zealand Herald*. September 14, 2007. https://www.nzherald.co.nz/nz/news/article.cfm?c_id=1&objectid=10463579
12. Local officials nearly fall for H₂O hoax. *NBC-News.com*. March 15, 2004. http://www.nbcnews.com/id/4534017/ns/technology_and_science-science/t/local-officials-nearly-fall-ho-hoax/
13. Pitäisikö lakia tiukentaa vetyhapon saatavuuden ja käytön osalta? (in Finnish). *Sosiaalinen Vaalikone*. February 25, 2011. Archived from the original on May 29, 2013. <https://web.archive.org/web/20130529114948/http://old.sosiaalinenvaalikone.com/kysymykset.php?id=12894>
14. Smith M., Love D.C., Rochman C.M., Neff R.A. Microplastics in seafood and the implications for human health // *Curr. Environ. Health Rep.* 2018. V. 5. № 3. P. 375–386.
15. Helmes R.J.K., Huijbregts M.A.J., Henderson A.D., Jolliet O. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale // *Int. J. Life Cycle Assess.* 2012. V. 17. P. 646–654.
16. Tarasova N.P., Makarova A.S., Vasileva E.G., Savelova D.D. Estimation of the phosphorus loading with consideration for the planetary boundaries (for the Russian Federation as an example) // *Pure and Applied Chemistry*. 2017. V. 89. P. 287–292.
17. Тарасова Н.П., Макарова А.С., Васильева Е.Г. и др. Оценка фосфорной нагрузки на пресные водоёмы субъектов Российской Федерации: моделирование миграции фосфора и его соединений между компонентами окружающей среды // *Доклады Академии наук*. 2018. № 6. С. 717–721.
18. UN. The General Assembly WG Report on Sustainable Development Goals. A / 68/970. 12.08.2014.
19. Tundo P., Anastas P., Black D. StC. et al. Synthetic pathways and processes in green chemistry. Introductory overview // *Pure and Applied Chemistry*. 2000. V. 72. № 7. P. 1207–1228.
20. Нефёдов О.М., Лунин В.В., Тарасова Н.П. Химия и проблемы устойчивого развития и сохранения окружающей среды // *Успехи химии*. 2010. № 6. С. 491–492.
21. Pike Research. Green chemistry: biobased chemicals, renewable feedstocks, green polymers, less-toxic alternative chemical formulations, and the foundations of a sustainable chemical industry // *Industrial Biotechnology*. 2011. V. 7. № 6. P. 431–433.
22. Тарасова Н.П., Макарова А.С., Вавилов С.Ю. и др. Зелёная химия и российская промышленность // *Вестник РАН*. 2013. № 12. С. 1068–1075.
23. Makarova A.S., Xuexiu J., Kruchina E.B. et al. Environmental performance assessment of the chemical industries involved in the Responsible Care® Program: Case study of the Russian Federation // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 222. P. 971–985.