

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

© 2016 В.В. Заболотских, А.В. Васильев, Ю.П. Терещенко

Самарский научный центр РАН

Статья поступила в редакцию 09.11.2016

Сочетанное действие на организм химических и физических факторов окружающей среды в большинстве случаев сопровождается проявлением синергетических эффектов, превышающих суммарное воздействие этих факторов. Рассмотрены особенности учёта синергетических эффектов воздействия факторов различной природы, необходимого для объективной оценки экологического состояния окружающей среды и выявления рисков здоровью человека в условиях одновременного воздействия химических и физических факторов.

Ключевые слова: синергетические эффекты, сочетанное воздействие физических и химических факторов, токсический эффект, экологические риски, риски для здоровья населения.

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН, Шифр темы: 0239-2014-0010

Для вопросов охраны окружающей среды большое значение имеет комбинированное воздействие загрязняющих веществ на организм человека [1-10].

При комбинированном действии на человека поллютантов возможны три типа их взаимодействия — **аддитивный** (эффект равен сумме эффектов каждого фактора), **синергетический**, или **потенцирующий** (совместный эффект больше суммы эффектов при их независимом действии), **антагонистический** (общий эффект меньше суммы эффектов каждого фактора).

Синергетическое взаимодействие факторов среды представляет особую опасность для человека, причем в этом случае решающую роль играет не только действие токсикантов, но и определенные значения параметров других экологически адекватных факторов.

Синергетический эффект проявляется в том, что влияние нескольких видов агентов не равнозначно их простому накоплению — происходит одновременное поражение нескольких систем организма разными видами лимитирующих факторов, что приводит к более серьезным последствиям в организме. Кроме этого может происходить и биологическое усиление действия этих агентов по мере их прохождения по биогеохимическим циклам и пищевым цепям.

Заболотских Влада Валентиновна, кандидат биологических наук, доцент, научный сотрудник отдела инженерной экологии и экологического мониторинга.

E-mail: Vlada310308@mail.ru

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела инженерной экологии и экологического мониторинга. E-mail: avassil62@mail.ru

Терещенко Юлия Петровна, инженер отдела инженерной экологии и экологического мониторинга.

E-mail: ulchik1989@yandex.ru

В соответствующей литературе показан синергетический тип взаимодействия низкой температуры воздуха и вибрации, холода и недостатка кислорода. Загрязненный воздух повышает заболеваемость сердечно-сосудистой системы городского населения на 44%, а рост акустического дискомфорта — на 20%, совместное же их действие может повысить заболеваемость почти в два раза. Отмечено потенцирующее влияние оксидов углерода и шума, оксида углерода и двуокиси серы (усиление отрицательного действия на нервную систему, снижение иммунологической реактивности), оксида углерода и окислов азота, оксида углерода и электромагнитных полей. По экспериментальным данным, в присутствии свинца канцерогенность углеводородов увеличивается в пять раз.

Установлено, что важным фактором среды, синергически взаимодействующим с наиболее распространенными сегодня лимитирующими агентами (химическими поллютантами, ионизирующим и ультрафиолетовым излучениями), является тепло. Иными словами, повышенная температура окружающей среды, а также температура тела человека могут оказывать модифицирующее влияние при воздействии других агентов.

Подобные исследования имеют огромное значение, так как прежде всего важно оценить принципиальную возможность синергического взаимодействия вредных для живых организмов факторов при реально встречающихся в повседневной жизни количествах загрязняющих окружающую среду агентов. Для этого необходимо изучить зависимость величины эффекта синергизма от уровня воздействия поллютантов, используемых в комбинации с другими агентами.

Многие ксенобиотики при комбинированном воздействии на организм вызывают токсический

эффект, превышающий аддитивность – *синергетический эффект*. Механизмы синергетических эффектов могут быть различными. Синергетический эффект по механизму химического взаимодействия ксенобиотиков проявляют смеси озона с диоксидом азота, непредельными углеводородами, диоксидом серы, аэрозолем серной кислоты, взаимодействующие с образованием более токсичных раздражающих газов (пероксидов, эпоксидов и альдегидов), смеси дихлорэтилена с Na_2O и NaOH , взаимодействующие в условиях высокой температуры и влажности с образованием высокотоксичного дихлорацетилен, и смеси ряда других композиций.

Одним из наиболее распространенных физиологических механизмов синергетического действия является торможение одним веществом процессов биотрансформации другого вещества, например, воздействуя на ферментную систему, которая осуществляет его детоксикацию. Усиление токсического эффекта по такому механизму наблюдается при комбинированном воздействии фосфорорганических препаратов (хлорофоса и карбофоса, хлорофоса и метафоса, карбофоса и тиофоса и др.). При их совместном воздействии превышение простой суммы вызываемых эффектов обусловлено подавлением холинэстеразы одним веществом и торможением вследствие этого детоксикации другого.

Эффект, превышающий простую сумму, при совместном хроническом воздействии установлен для монооксида углерода и оксидов азота, смеси диалкилфенилфосфата, дибутилфталата и полихлорвинила, смеси 1,1,1-три-хлор-2,2-бис(п-хлорфенил)этана (ДДТ) и этилового спирта, соединений марганца и фтора, этилового спирта и мышьяка, этилового спирта и тиурамдисульфида, озона и аэрозоля серной кислоты. Усиление канцерогенной активности установлено при совместном воздействии нитробензола и бензидинсульфата. Значительное усиление влияния на репродуктивную функцию организма проявляют при совместном хроническом воздействии смеси бензина и хлорированных углеводородов.

При комплексном воздействии ксенобиотиков на организм в зависимости от их физико-химических свойств, рецепторов, на которые они воздействуют в организме, в зависимости от механизма действия возможны те же комбинации эффектов: аддитивное, синергетическое и антагонистическое действие. Например, установлено, что токсический эффект при воздействии малых доз и низких концентраций формальдегида при одновременном поступлении его ингаляционным и пероральным путем не превышает простую аддитивность. При комплексном воздействии бензола при поступлении его в организм с водой и с вдыхаемым воздухом токсический эффект, в зависимости от уровня доз и концентраций, проявляется неоднозначно:

- на уровне высоких концентраций наблюдается более чем аддитивный (синергетический) эффект;

- по мере уменьшения воздействующих концентраций ксенобиотика действие становится более аддитивным.

Сочетанное действие на организм ксенобиотиков и физических факторов окружающей его среды в большинстве случаев сопровождается проявлением синергетических эффектов. Это обусловлено прежде всего тем, что взаимозависимый эффект химических и физических факторов среды проявляется в тех случаях, когда при определенной интенсивности воздействия одного из них понижается общая реактивность организма и повышается чувствительность его к действию другого фактора. При определенных уровнях воздействия каждый из действующих на организм факторов может приобретать доминирующее значение в их суммарном биологическом эффекте.

При достаточно низкой, но гигиенически значимой концентрации токсичного вещества влияние физического фактора среды существенно увеличивается при повышении интенсивности или времени его воздействия. И, наоборот, при равной интенсивности воздействия физического фактора среды значение ксенобиотика в суммарном биологическом эффекте, как правило, возрастает при увеличении его концентрации во вдыхаемом воздухе или других смесях веществ, поступающих в организм.

Влияние температурного фактора обусловлено изменением скорости протекания токсического процесса и функционального состояния организма (повышением чувствительности организма к токсическому действию ксенобиотика, нарушением механизма терморегуляции организма и водно-солевого обмена, кровообращения, дыхания и других биохимических процессов). При этом, с одной стороны, происходит воздействие ксенобиотика на измененный организм, с другой – взаимодействие организма и ксенобиотика снижает устойчивость организма к воздействию высокой или, наоборот, низкой температуры. Вследствие этого одновременное воздействие на организм вредных веществ и высокой или низкой температуры окружающей среды приводит к непропорциональному суммированию их биологических эффектов, вызывая так называемый «синдром взаимного отягощения».

Выраженность токсического эффекта при сочетанном воздействии ксенобиотиков с повышенной или пониженной температурой зависит от величины изменения температуры, пути поступления токсичного вещества в организм, его концентрации или дозы, длительности и режима воздействия.

При повышенных температурах синергетический эффект сочетанного действия проявляют монооксид углерода, оксиды азота, ртуть, не-

которые соединения тяжелых металлов, бензин, анилин, хлорофос, иприт и другие химические соединения. При пониженной температуре окружающей среды синергетический эффект сочетанного действия установлен для монооксида углерода, оксидов азота, сероуглерода и ряда других веществ.

Повышенная влажность воздуха усиливает токсический эффект ксенобиотиков, вступающих в химическое и физико-химическое взаимодействие с влагой вдыхаемого воздуха (оксидов азота, некоторых хлорсодержащих соединений, диоксида серы, сероводорода и др.), повышает чувствительность организма к токсическому действию фтористых соединений и некоторых углеводородов нефти, но уменьшает токсическое действие бензина.

Шум и вибрация усиливают токсический эффект ксенобиотиков и ускоряют проявление их токсического действия. Установлено усиливающее действие шума на биологическое действие монооксида углерода, крекинг-газа, аэрозоля борной кислоты, кварцевой пыли. Под влиянием общей вибрации установлено усиление токсического действия фтора, свинца, пыли металлического кобальта, кварцевой пыли.

Сочетанное действие на организм лучистой энергии и ксенобиотиков проявляется неоднозначно. УФ-облучение в дозах, близких к оптимальной величине, повышает устойчивость организма к ксенобиотикам. Однако более высокие дозы, превышающие оптимальную величину, или дефицит естественной УФ-радиации снижают устойчивость организма к воздействию токсичных веществ.

Сочетанное действие ионизирующей радиации и ксенобиотиков изучено в основном в условиях однократного (острого) воздействия на организм. Установлено, что предварительное или одновременное с ионизирующей радиацией острое воздействие химических веществ, вызывающих развитие в организме той или иной формы гипоксии (монооксид углерода, нитрит натрия, анилин и его производные, цианиды, нитрилы и др.), сопровождается ослаблением тяжести радиационного поражения. Это обусловлено тем, что в момент воздействия ионизирующей радиации в организме под влиянием таких токсичных веществ создаются гипоксические условия, ослабляющие развитие первичных радиохимических процессов.

Другая группа химических веществ, к которой относятся ртуть и ее соединения, пероксид метилэтилкетона, формальдегид, акриловая кислота и ряд других соединений с неопределенными связями, обладает радиосенсибилизирующим действием. Одновременное воздействие этих токсичных веществ с ионизирующей радиацией сопровождается усилением ее поражающего действия.

Предположительно и третья группа веществ, которые при определенных малых дозах защищают организм от поражающего действия радиации, но в случае увеличения дозы, наоборот, вызывают усиление радиобиологического эффекта.

Физическая нагрузка, оказывающая значительное и разностороннее влияние на все органы и функциональные системы организма, в определенной степени обуславливает условия резорбции, распределения, превращения и выделения токсичных веществ, а в конечном итоге определяет развитие и скорость протекания интоксикации. Эффект сочетанного действия физической нагрузки и ксенобиотиков зависит от многих условий: характера и интенсивности нагрузки, степени утомления, природы токсичных веществ и рецепторов, на которые они воздействуют в организме, характера изменений в различных органах и системах.

Сильное мышечное напряжение, влияя на физические процессы в том же направлении, что и высокая температура окружающей среды, усиливает токсическое действие метгемоглобинообразователей, монооксида углерода, цианидов, паров хлороводородной кислоты, четыреххлористого углерода, некоторых антихолинэстеразных веществ, дихлорэтилсульфида, свинца, ртути и ряда других веществ. Однако при совместном воздействии физической нагрузки и хлорофоса было отмечено снижение токсичности последнего.

Гигиенические и медико-биологические исследования, проведенные в разных отраслях промышленности (горнодобывающей, металлургической, машиностроительной, химической) и сельском хозяйстве, свидетельствуют о возможном действии комплекса вредных факторов производственной среды на организм работников. Так, проведение взрывных работ сопровождается выделением в воздух оксидов углерода и азота, воздействием неблагоприятного микроклимата, интенсивного шума и вибрации; в доменных, мартеновских, кузнечно-прессовых и термических цехах рабочие подвергаются вредному воздействию неблагоприятного микроклимата, пыли, оксида углерода, сернистого газа; получение искусственных кож на основе поливинилхлорида сопровождается выделением в воздух паров хлорвинила, дибутилфталата, хлороводорода и пыли силиката свинца.

В некоторых случаях влияние комплекса химических факторов производственной среды обусловлено многокомпонентным составом применяемых в производстве или получаемых продуктов (каменноугольные смолы и лаки, комбинированные пестициды), или технологических выбросов (сварочные аэрозоли). Современные технологические процессы характеризуются одновременным поступлением в воздух рабочей зоны производственных помещений не одиночных, а, как правило, нескольких или многих вредных хи-

Таблица 1. Виды эффектов при сочетанном воздействии факторов различной природы

Сочетанное действие - одновременное или последовательное воздействие на организм факторов различной природы (химических, физических, биологических).		
Антагонистический эффект	Аддитивный эффект (эффект суммации)	Синергетический (потенцирование) эффект
<p>Повышенная влажность воздуха уменьшает токсическое действие бензина. УФ-облучение в дозах, близких к оптимальной величине, повышает устойчивость организма к токсикантам. Установлено, что предварительное или одновременное с ионизирующей радиацией острое воздействие химических веществ, вызывающих развитие в организме той или иной формы гипоксии (монооксид углерода, нитрит натрия, анилин и его производные, цианиды, нитрилы и др.), сопровождается ослаблением тяжести радиационного поражения. Это обусловлено тем, что в момент воздействия ионизирующей радиации в организме под влиянием таких токсичных веществ создаются гипоксические условия, ослабляющие развитие первичных радиохимических процессов. При совместном воздействии физической нагрузки и хлорофоса было отмечено снижение токсичности последнего.</p>		<p>При повышенных температурах синергетический эффект сочетанного действия проявляют монооксид углерода CO, оксиды азота NO_x, ртуть Hg, некоторые соединения тяжелых металлов, бензин, анилин, хлорофос, иприт и другие химические соединения.</p> <p>При пониженной температуре окружающей среды синергетический эффект сочетанного действия установлен для монооксида углерода, оксидов азота, сероуглерода и ряда других веществ.</p> <p>Повышенная влажность воздуха усиливает токсический эффект ксенобиотиков (оксидов азота, некоторых хлорсодержащих соединений, диоксида серы, сероводорода и др.), повышает чувствительность организма к токсическому действию фтористых соединений и некоторых углеводородов нефти.</p> <p>Шум и вибрация усиливают токсический эффект ксенобиотиков и ускоряют проявление их токсического действия.</p> <p>Шум усиливает биологическое действие монооксида углерода, крекинг-газа, аэрозоля борной кислоты, кварцевой пыли.</p> <p>Вибрация усиливает токсическое действие фтора, свинца, пыли металлического кобальта, кварцевой пыли.</p> <p>Высокие дозы УФ-облучения, превышающие оптимальную величину, или дефицит естественной УФ-радиации увеличивают воздействие токсичных веществ, снижая устойчивость организма.</p> <p>Группа химических веществ - ртуть и ее соединения, пероксид метилэтилкетона, формальдегид, акриловая кислота и ряд других соединений с непредельными связями, увеличивают радиосенсибилизирующее действие. Одновременное воздействие этих токсичных веществ с ионизирующей радиацией сопровождается усилением ее поражающего действия.</p> <p>Сильное мышечное напряжение усиливает токсическое действие метгемоглобинообразователей, монооксида углерода, цианидов, паров хлороводородной кислоты, четыреххлористого углерода, некоторых антихолинэстеразных веществ, дихлорэтилсульфида, свинца, ртути и ряда других веществ.</p>

мических веществ. Например, в производстве высокомолекулярных соединений (синтетических смол и пластических масс, каучуков, резин, синтетических волокон), а также многих продуктов нефте-, коксо- и сланцехимии рабочие подвергаются вредному действию не двух-трех, а нескольких десятков токсических веществ.

Существование оптимального соотношения воздействующих агентов указывает на возможность комбинирования величин их воздействия как для достижения максимального синергизма, так и для снижения. Оба варианта представляются важными с позиции оценки влияния лимитирующих факторов окружающей среды на человека и биоту.

Система экологического мониторинга в рамках обеспечения безопасности населения в условиях техногенного воздействия должна включать оптимальный выбор методов наблюдений, которые помимо прямого токсического действия загрязняющих веществ на организм позволяют также достоверно оценивать синергетическое действие токсикантов.

Изучалось техногенное влияние и факторы негативного воздействия на человека в условиях промышленной площадки ОАО «Автозаводстрой».

Традиционные химико-аналитические исследования при экологическом мониторинге компонентов окружающей среды базируются на данных по ингредиентам, установленным при анализе приоритетности определения ингредиентов в массе загрязняющих веществ техногенного происхождения.

В реальных условиях окружающей человека среды наибольшую практическую значимость имеет определение токсических эффектов при сочетанном действии на организм различных ксенобиотиков и физических факторов среды, таких как высокая и низкая температура, повышенная или пониженная влажность атмосферного воздуха, шум и вибрация, различного рода излучения, а также физическая нагрузка.

Сочетанное действие на организм ксенобиотиков и физических факторов окружающей его среды в большинстве случаев сопровождалось проявлением синергетических эффектов. Это обусловлено, прежде всего, тем, что взаимозависимый эффект химических и физических факторов среды проявляется в тех случаях, когда при определенной интенсивности воздействия одного из них понижается общая реактивность организма и повышается чувствительность его к действию другого фактора. При определенных уровнях воздействия каждый из действующих на организм факторов может приобретать доминирующее значение в их суммарном биологическом эффекте.

При достаточно низкой, но гигиенически значимой концентрации токсичного вещества

влияние физического фактора среды существенно увеличивалось при повышении интенсивности или времени его воздействия. И, наоборот, при равной интенсивности воздействия физического фактора среды значение ксенобиотика в суммарном биологическом эффекте, как правило, возрастало при увеличении его концентрации во вдыхаемом воздухе или других смесях веществ, поступающих в организм.

Прогнозирование токсических эффектов на основе физиологических механизмов комбинированного действия ксенобиотиков обусловлено установлением механизмов их взаимовлияния на биотрансформацию в организме человека и животных. В зависимости от активности загрязняющего вещества происходит образование многочисленных, порой не прогнозируемых соединений, обладающих более токсичными свойствами для биоценозов окружающей среды, чем первоначально определяемые ингредиенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.В., Заболотских В.В. Особенности сочетанного воздействия физических и химических факторов на население урбанизированных территорий // Журнал Экологии и промышленной безопасности. 2012. № 3-4. С. 47 – 52.
2. Васильев А.В., Бынина О.В., Заболотских В.В. Анализ сочетанного воздействия акустических и электромагнитных загрязнений на примере г. Тольятти // Сборник докладов шестой научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и пути их решения», г.Тольятти, 30 ноября – 1 декабря 2012 г., г.Самара: изд-во Самарского научного центра РАН, 2012. С. 55 - 60.
3. Васильев А.В. Экологический мониторинг физических загрязнений на территории Самарской области. Снижение воздействия физических загрязнений: Монография. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2009, 140 с.
4. Власов В.Н. Сочетанное воздействие толуола, общей вибрации и шума на сердечно-сосудистую систему экспериментальных животных // Труды IX Всероссийского конгресса «Экология и здоровье человека». Самара, 2004. С. 41-45.
5. Заболотских В.В., Васильев А.В., Терещенко Ю.П. Изучение приоритетных токсикантов атмосферного воздуха урбанизированных территорий на примере города Тольятти // Федеральный ежеквартальный журнал «Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера». 2012. №1' (январь-март).
6. Заболотских В.В., Терещенко Ю.П. Изучение свойств токсикантов города Тольятти и их влияния на здоровье человека на базе информационных технологий // Сборник докладов научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и пути их решения», 3 декабря 2010 г., г. Тольятти: - Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. С.100 – 103.
7. Заболотских В.В., Васильев А.В. Комплексный мониторинг антропогенного загрязнения в системе обеспечения экологической безопасности города

- // Вектор науки ТГУ. 2012. № 2 (20). С.58 – 62.
8. *Заболотских В.В., Васильев А.В.* Мониторинг токсического воздействия на окружающую среду с использованием методов биоиндикации и биотестирования: Монография. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2012. 233 с.
 9. *Vasilyev A.V., Zabolotskikh V.V., Vasilyev V.A.* Development of methods for the estimation of impact of physical factors on the health of population // Safety of Technogenic Environment. 2013. № 4. Pp. 42-45.
 10. *Vasilyev A.V.* Method and approaches to the estimation of ecological risks of urban territories // Safety of Technogenic Environment. 2014. № 6. Pp. 43-46.

SYNERGETIC EFFECTS DURING COMBINED IMPACT OF PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS

© 2016 V.V. Zabolotskikh, A.V. Vasilyev, Yu.P. Tereshchenko

Samara Scientific Center of Russian Academy of Science

Combined action on human organism of chemical and physical factors of the environment in most cases is followed by manifestation of the synergetic effects exceeding total influence of these factors. The accounting of synergetic effects of influence of factors of various nature is considered for objective assessment of ecological state of environment and identification of risks to health of the person in the conditions of simultaneous influence of chemical and physical factors.

Keywords: synergetic effects, the combined influence of physical and chemical factors, toxic effect, environmental risks, risks for health of the population.

Vlada Zabolotskikh, Candidate of Biology, Associate Professor, Research Fellow of Department of Engineering Ecology and Ecological Monitoring. E-mail: Vlada310308@mail.ru

Andrey Vasilyev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Engineering Ecology and Ecological Monitoring. E-mail: avassil62@mail.ru

Yulia Tereshchenko, Engineer of Department of Engineering Ecology and of Ecological Monitoring. E-mail: ulchik1989@yandex.ru