

Статья на Международную научно-практическую конференцию «Инновации в охране окружающей среды для устойчивого социально-экономического развития: Глобальное и Евразийское партнерство»

Комплексный подход к нормированию действия микроэлементов в трофических цепях

А.В. Синдирева

(Тюменский Государственный Университет)

Решение актуальных задач охраны окружающей среды сопряжено с поиском эффективных приемов экологического нормирования содержания элементов в объектах окружающей среды. На сегодняшний день в научном сообществе ведутся дискуссии о степени эффективности и адекватности применяемых нормативных показателей для оценки качества окружающей среды. Большинство исследователей приходит к мнению, что разрабатываемые нормативы (в частности, ПДК химических элементов) не в полной мере способны оценить состояние окружающей среды с целью обеспечения экологической безопасности живых организмов, обитающих в ней [1,2,3,4]. Так, современные ПДК не учитывают комплекс экологических условий исследуемой территории, вид организма, эффект взаимодействия элементов друг с другом при поступлении в живой организм, явления биотрансформации при продвижении по пищевым цепям.

Решением этой проблемы, по-видимому, является поиск интегральных показателей нормирования, разработанных с использованием методов математического моделирования закономерностей действия химических элементов в трофических цепях с учетом биогеохимической ситуации конкретной экосистемы [4].

Анализируя отечественную и зарубежную литературу по вопросам нормирования содержания химических элементов в окружающей среде и дальнейшего включения этой информации в систему мероприятий по экологическому мониторингу, мы пришли к выводу, что основные этапы оценки, прогноза и нормирования действия микроэлементов должны выстраиваться по следующей схеме [4]:

- 1 этап. Оценка элементного статуса объектов окружающей среды, сложившегося в регионе под действием природных и антропогенных факторов.
- 2 этап. Прогноз и оценка действия химических элементов на основе моделирования их распространения и поведения в окружающей среде.
- 3 этап. Определение нормативов действия микроэлементов на основе комбинации результатов мониторинга с данными, полученными с применением моделирования.
- 4 этап. Принятие решения о целесообразности, приоритетности и эффективности оздоровительных и природоохранных мероприятий,

направленных на оптимизацию микроэлементного статуса в системе почва–растение–животное.

В данной статье представлен ряд основных аспектов разработки научно обоснованной интеграционной системы нормативов оценки и прогноза действия ряда микроэлементов в трофических цепях в условиях Западной Сибири.

Первый этап нормирования – анализ микроэлементного статуса объектов окружающей среды для конкретного региона. Он дает научно-обоснованную основу для перехода к следующему этапу – постановке модельных экспериментов с целью оценки и прогноза действия микроэлементов в системе почва-растение-животное, позволяет выявить основные проблемы регионального характера, связанные с избытком, недостатком или дисбалансом химических элементов в объектах окружающей среды [4].

При оценке содержания ряда микроэлементов в основных типах почв Западной Сибири установлено, что пахотные почвы в основном не загрязнены избытком микроэлементов, их содержание в основном не превышает 0,5 ПДК[4;5;6;7;8]. В то же время отмечено загрязнение тяжелыми металлами почв пригородных зон, а также расположенных на территории техногенных эмиссий (золоотвалы, автомагистрали, промышленные выбросы), сопровождающееся увеличением ПДК в них. Однако с позиции экологической безопасности необходимо обратить внимание на другую биогеохимическую проблему - дефицита в почвах и в продукции кормовых и других культур на сельскохозяйственных угодьях эссенциальных микроэлементов – Co, Cu, Mn, Zn, Se, I и др.[4;5;6;7;8;9;10].

Например, нашими исследованиями в 2020-2021 гг. установлено, что содержание селена в почвах черноземного ряда в условиях юга Западной Сибири составляет: в черноземе обыкновенном (в среднем $0,053 \pm 0,01$ мг/кг) и южном (в среднем $0,034 \pm 0,01$ мг/кг), черноземе выщелоченном в среднем $0,082 \pm 0,007$ мг/кг). Среднее содержание селена в черноземах находится в интервале от 0,025-0,075 мг/кг. В наших исследованиях селен определяли атомно-абсорбционным методом. Данные значения свидетельствуют о низком содержании этого микроэлемента в почве[10].

Аналогичная ситуация отмечается и по йоду. Так, согласно проведенным нами исследованиям в 2020-2021 гг., в лугово-черноземных почвах составляет в среднем $2,03 \pm 1,04$ мг/кг, в черноземе обыкновенном $2,85 \pm 0,065$ мг/кг. Согласно градации Ковальского В.В. (1972), такое содержание микроэлемента оценивается как недостаточное.

Низкое содержание микроэлементов в системе почва-растение свидетельствует о наличии агрохимической проблемы – истощения в почвах запасов их подвижной и доступной растениям формы. Это указывает на недостаточную минеральную полноценность растительной продукции. Таким образом, при разработке мероприятий по агроэкологическому мониторингу и нормировании содержания микроэлементов в системе почва-

растение-животное необходимо учитывать проблему не только избыточного, но и недостаточного содержания микроэлементов.

Проведенные многолетние исследования, проводимые в рамках экологического мониторинга, свидетельствуют о том, что проблема нормирования микроэлементного состава окружающей среды должна рассматриваться не только с позиции использования разработанных ПДК тех химических элементов, которые традиционно считаются токсичными элементами. Необходимы разработанные критерии для тех элементов, недостаток которых отмечается на территории многих регионов. Для большинства из них, как правило, отсутствуют четко установленные критические и оптимальные концентрации. Кроме того, ситуация осложняется отсутствием унифицированных аналитических методик определения данных элементов, поэтому диапазон их концентраций необходимого и токсического действия может значительно варьировать в научной литературе. Это значительно затрудняет интерпретацию полученных данных об их содержании в объектах окружающей среды, а, следовательно, делает труднодостижимыми научно обоснованные мероприятия по коррекции микроэлементозов с учетом региональных особенностей.

Поэтому в своих исследованиях мы особое внимание уделяем комплексной оценке содержания и действия таких элементов, как селен и йод с учетом экологической ситуации территории.

Помимо оценки фактического содержания микроэлементов, для формирования интегральной системы нормирования должны быть проведены модельные полевые и лабораторные исследования. Следует отметить, что этап, направленный на установление математических закономерностей действия микроэлементов в трофических цепях с учетом геохимических, агроэкологических условий, специфики влияния определенного химического элемента на растительный и животный организм, имеет особое значение. Полученные в результате моделирования нормативы действия химических элементов в трофических цепях позволяют «управлять» процессом минерального питания растений и животных, а также диагностировать и предотвращать негативные процессы, вызванные избытком, недостатком или дисбалансом микроэлементов в объектах окружающей среды.

На основе проведенных нами многолетних исследований для ряда микроэлементов была разработана модель прогноза их действия в системе почва-растение-животное [4, 11, 12].

Первичным звеном для оценки являлась почва, где предусматривалось установление предельно допустимой концентрации микроэлемента. Согласно публикациям В.Б. Ильина (1982, 1991, 2001), нормирование содержания микроэлементов в почве может преследовать различные цели исходя из функциональной многозначности почвы (почва – природное тело, компонент биогеоценоза, почва – средство и объект сельскохозяйственного использования, почва – среда обитания) [6].

Нашими исследованиями разработаны коэффициенты интенсивности действия единицы внесённых микроэлементов на их содержание в почве. Использование таких нормативов позволит прогнозировать накопление химических элементов в почве в результате их антропогенного поступления с учетом физико-географических условий территории исследования. Данный норматив используется для установления оптимального и критического содержания микроэлементов в растениях, применяемых для разных целей (агрономической или санитарно-гигиенической) нормирования. С помощью установленного норматива можно прогнозировать накопление химического элемента в почве в случае его антропогенного поступления или напротив, рассчитать дозировку внесения элемента, необходимую для достижения оптимальной или токсичной концентрации[4].

Например, с помощью с коэффициентов « b » интенсивности действия 1 кг селена удобрений на содержание валового Se ($b_1=0,44$ мг/ кг) и водорастворимого ($b_2=0,0012$ мг/кг), установленных в результате многолетних исследований на лугово-черноземной почве южной лесостепи Западной Сибири, можно рассчитать количество вносимого селена в почву, при котором его накопление достигнет предельно-допустимой концентрации.

Для примера мы используем опубликованные в литературе ПДК для Se[4,6] и проведем расчет для валового содержания микроэлемента (табл. 1).

Таблица 1

Расчетная доза Se, необходимая для достижения ПДК в почве [4]

Элемент	ПДК, мг/кг	b , мг/кг	$C_{\text{факт}}$, мг/кг	$C_{\text{расч}}$, кг/га
Se	10	0,44	0,46	21,7

Исходя из данных таблицы 1, мы можем сделать вывод о том, что для достижения ПДК селена в лугово-черноземной почве следует внести 21,7 кг/га микроэлемента. Такой критерий зависит от многих свойств почвы и может быть дифференцирован для определенного ее типа, подтипа.

Предложенная методика расчета нормативов внесения микроэлемента может быть использована в природоохранных целях при определении критических концентраций поступления микроэлемента (на данном примере, селена) в почву, а также при расчете оптимальных дозровок элемента, используемого в качестве микроудобрения.

Механизм нормирования химических элементов в почве зависит от его цели. Почвы, только начавшие загрязняться, должны быть подвергнуты жесткому контролю для полного сохранения их нативных свойств [4,6].

Поэтому если содержание нормируемого химического элемента не является высоким, требуются особо чувствительные методы. Поскольку данных о нормировании содержания микроэлементов в почве с позиций биоиндикации и биотестирования немного, первым этапом при нормировании необходимо установление его влияния на биоценоз почвы. Одним из наиболее чувствительных тестом в данном случае является

микробиологическая активность почвы. Наши исследования позволили установить тесные корреляционные зависимости между уровнем микроэлементов в почве и численностью ряда агрономически важных микроорганизмов и на основе полученных данных определить оптимальные и токсические уровни микроэлементов по отношению к почвенным микроорганизмам[4]. Например, в условиях лабораторных и полевых опытов с применением селена в виде селенита натрия на лугово-черноземной почве установлено, что наибольшая численность микроорганизмов отмечается при концентрации селена в почве в среднем 5 мг/кг, аналогичная концентрация микроэлемента благоприятна для олигонитрофилов и фосфатмобилизирующих бактерий. В то же время численность нитрификаторов максимальная при достижении 10 мг/кг микроэлемента в почве (данное содержание соответствует установленному в литературе ПДК селена). Однако почвенные грибы и целлюлозоразлагающие микроорганизмы при таком уровне микроэлемента испытывают угнетение, оптимум для данных организмов – 2,5 мг/кг. Такие прогнозные расчеты необходимы для решения вопросов, в частности, обогащения почв селено содержащими удобрениями в селено дефицитных регионах.

Полученные экспериментальные данные позволяют связать рассчитанные коэффициенты «*b*» единицы внесенного микроэлемента в почву и его критические уровни содержания в почве и определить дозу вносимого микроэлемента, при которой достигается критический или оптимальный для микрофлоры почвы уровень.

Пороговые и оптимальные концентрации микроэлементов в почве можно устанавливать исходя их предельных концентраций их в растениях, произрастающих на данных почвах и употребляемых в дальнейшем в пищу животными и человеком. В данном случае почва рассматривается как средство и объект сельскохозяйственного использования, а главной целью нормирования является обеспечение получения гигиенически пригодной и экономически оправданной растительной продукции, т.е. при этом должны учитываться два аспекта: качество и урожайность культур. Одним из этапов данного блока исследований является определение оптимальных уровней содержания микроэлементов в растениях, соответствующих максимальной урожайности, выявленных на основании данных химического состава растений и рассчитанных математических зависимостей[4]. Например, исследования, проведенные с кормовыми культурами в условиях южной лесостепи на лугово-черноземных почвах, установили, что оптимальное содержание селена в растениях в среднем изменяется от $1,2 \pm 0,15$ мг/кг (зеленая масса рапса ярового) до $1,9 \pm 0,2$ мг/кг (зеленая масса астрагала галеговидного). В то же время в полевых опытах с яровой мягкой пшеницей, проведенных в тех же условиях, оптимальное содержание селена в зерне составляло $2,61 \pm 0,23$ мг/кг. Таким образом, потребность культур в микроэлементах во много определяется не только условиями их произрастания, но и их биологическими особенностями.

Полученные результаты исследований необходимо учитывать при возделывании сельскохозяйственных культур и в дальнейшем при употреблении растений в пищу человека и животных. Выявление особенностей поведения микроэлементов в системе почва – растение – животный организм необходимо для профилактики и лечения болезней, вызванных избытком, недостатком или дисбалансом микроэлементов[4]. Проведенные многолетние исследования по оценке действия микроэлементов с целью нормирования их действия в трофических цепях позволяют сделать следующие обобщенные выводы:

- содержание микроэлементов в растительном организме, оказывающем положительное влияние на урожайность культур, может быть токсично для животных, систематически потребляющих данные растения;
- установленные нормативы содержания микроэлементов в почвах и растениях значительно меньше принятых на сегодняшний день в литературе показателей ПДК, что доказывает необходимость применения при мониторинге и разработке природоохранных мероприятий интегральных показателей, принятых для конкретных агроэкологических условий;
- разрабатывать ПДК должны совместно микробиологи, почвоведы, агрохимики, ветеринары, гигиенисты, медики;
- при разработке нормативов необходимо учитывать биогеохимические условия территории, статус химических элементов в объектах окружающей среды, их фоновое содержание. С этих позиций особый интерес представляет разработка фоновых нормативов содержания микроэлементов;
- при оценке действия микроэлементов в системе почва-растение-животное необходимо учитывать два аспекта: гигиенический (оценивается поступление микроэлементов с растительной пищей в суточный рацион животных и человека) и агрономический (оценивается связь урожайности растений с содержанием в почве подвижной формы микроэлементов). При этом, помимо эдафических факторов, действие микроэлементов зависит от метеорологических условий года, биологических особенностей живого организма. Кроме того, одна из сложнейших биогеохимических проблем - взаимодействие макро- и микроэлементов в объектах окружающей среды и живых организмах.

С учетом обозначенных аспектов, установленные закономерности действия микроэлементов в системе почва-растение-животное и разработанные на их основе нормативные показатели содержания элементов в компонентах трофических цепей являются научной основой для формирования комплекса природоохранных мероприятий, направленных на оптимизацию элементного статуса объектов окружающей среды, животных и в конечном итоге, человека.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № №20-55-44028.

Литература:

1. Черников В. А. Агрэкология / В.А. Черников, Р.М. Алексахин, А.В. Голубев. – М. : Колос, 2000. – 536 с.
2. Помазкина Л. В. Способ оценки экологической нагрузки, включая техногенное загрязнение, на экосистему / Л. В. Помазкина // Доклады ШМеждународ. науч.-практ. конф. «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде». – Т. 2. – Семипалатинск, 2004. – С. 624–632.
3. Юрин В. М. Основы ксенобиологии / В. М. Юрин. – М. : Новое знание, 2002. – 267 с.
4. Синдирева А.В, Критерии и параметры действия микроэлементов в системе почва-растение-животное: дис. ... д-ра биол. наук / А.В. Синдирева - Тюмень, 2012. – 462 с.
5. Сысо А. И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири / А. И. Сысо. –Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 277 с.
6. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва- растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
7. Красницкий В. М. Агрехимическая и экологическая характеристики почв Западной Сибири / В. М. Красницкий. – Омск: ОмГАУ, 2002. – 144 с.
8. Синдирева А.В., Красницкий В.М., Ермохин Ю.И. (2011) Региональные особенности содержания кадмия и цинка в почвах Омской области. Плодородие, 47-50.
9. Голубкина Н.А., Синдирева А.В., Зайцев В.Ф. Внутрорегиональная вариабельность селенового статуса населения// Юг России: экология, развитие. 2017. – Т. 12. № 1 (42). – С. 107-127. (№ 1433 перечня ВАК на 25.12.2017) (WebofScience)
10. Синдирева А.В., С.Г. Котченко, Гурьев Н.Е. «Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области», 2021 г
11. Синдирева А.В., Зайко О.А. Влияние повышенного содержания селена в почве на накопление его в рапсе яровом и состояние антиоксидантной активности в печени крыс/ Достижения науки и техники АПК. 2009. № 3. С. 45-47.
12. Синдирева А.В., Курдуманова О.И., Степанова О.В., Гилязова И.Б. Экологическая оценка различных способов применения иодида калия под зерновые культуры // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (125). – С. 134-141. (№ 197 перечня ВАК на 25.12.2017)