

## ТОКСИЧНОСТЬ КАК БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

© 2020 г. Е. М. Коробова\*

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,  
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия*

*\*e-mail: korobova@geokgi.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2020 г.

После доработки 10.04.2020 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

Понятие токсичности рассмотрено с позиций теоретической биогеохимии и геохимической экологии. Показано, что явление токсичности возникло и смогло значимо проявить себя только вследствие сознательного нарушения человеком систем саморегуляции и динамического равновесия, существовавшего в естественных биогеохимических циклах на протяжении всей истории существования биосферы. Благодаря этому, все живые организмы, несмотря на неравномерное распределение химических элементов в природной среде, практически постоянно находились в оптимальной геохимической обстановке. Подчеркивается, что все химические элементы как постоянные компоненты среды обитания являются объективно необходимыми для полноценного существования жизни, в силу чего безусловно токсических элементов не существует, существуют только дозы способные вызывать токсические эффекты. Обращено внимание на тот факт, что одинаково опасным является отклонение концентраций в обе стороны от оптимума, в силу чего нанесение существенного вреда организму может осуществляться, в том числе и путем создания искусственного дефицита ряда химических элементов, чьи эколого-геохимические свойства до сих пор изучены недостаточно. В статье также рассмотрена возможность применения нового методического подхода к решению проблемы, который проиллюстрирован на примере построения карты риска распространения рака щитовидной железы.

**Ключевые слова:** токсичность, биогеохимические эндемии, биогеохимические провинции, дефицит, геохимический оптимум, карты сочетанного природно-техногенного риска, рак щитовидной железы, йододефицит, <sup>131</sup>I

**DOI:** 10.31857/S0016752520100088

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно информации наиболее авторитетной базы данных Web of Science, число научных публикаций по проблеме токсикологии только за последние 5 лет (с 2015 г.) превышает 2000 единиц, и их количество год от года неуклонно возрастает. При этом большинство существующих энциклопедических словарей и справочников определяют понятие “токсические вещества”, как некоторую группу элементов и соединений, способных при попадании в организм значимо ухудшать физиологическое состояние растений, животных и, главным образом, человека. Причем в большинстве случаев речь идет именно о несанкционированном воздействии этих веществ, происходящем при взаимодействии живых организмов с окружающей средой.

Постоянное увеличение типов и количества таких веществ, регулярно обнаруживаемых в окружающей среде, действительно представляет собой серьезную экологическую проблему, кото-

рую пытаются решить, используя главным образом медицинские и санитарно-гигиенические подходы и, соответственно, расходуя на это крупные финансовые ресурсы. Однако, несмотря на это, множество фактов указывает на то, что по мере развития цивилизации в окружающей среде растут не только количество и объемы разнообразных загрязнителей, но параллельно увеличивается и список ранее не встречавшихся болезней, а число вновь выявленных больных растет пропорционально числу медицинских публикаций, свидетельствующих о связи содержания отдельных токсикантов с числом онкологических и спецификой протекания ряда соматических заболеваний. В сложившейся обстановке, когда токсическому воздействию в разной мере подвергается практически все население планеты, главные усилия соответствующих служб сосредоточены на том, чтобы выявить токсические свойства максимального числа химических веществ и всеми доступными средствами минимизировать биологическое воздействие тех из них, для которых такое

воздействие доказано. Для этого на территории России законодательным порядком устанавливаются нормы предельно допустимых концентраций (ПДК), а в США — пороговые величины (Threshold Limit Value [TLV]), в основе которых лежит лабораторное тестирование воздействия конкретных соединений на разные виды растений, животных и человека. При этом осуществляется мониторинг содержания уже многих сотен различных параметров в почвах, водах, кормах, продуктах питания и в других, самых разнообразных, объектах.

На данный момент такой подход является абсолютно доминирующим, называется индуктивно-эмпирическим, предполагает наличие разветвленной системы специализированных служб и, несомненно, дает полезные результаты, но одновременно имеет существенные и объективно непреодолимые недостатки. Один из них состоит в том, что неограниченный рост числа объектов контроля ведет к экономически неприемлемому росту затрат и закономерному снижению возможностей оперативного использования чрезмерно больших объемов разнородной информации. Второй недостаток состоит в том, что в большинстве случаев объекты контроля имеют специфическое пространственно-временное протекание, характеризующиеся значительной изменчивостью концентраций, например, мышьяка, свинца или бензола в почве, воде или растительности, из-за чего эффективность применения большинства действующих нормативов существенно снижается.

Сказанное, однако, не означает отсутствия выхода из складывающейся ситуации, хотя бы потому, что в соответствии с базовым принципом познания любая правильно сформулированная проблема должна иметь не только индуктивное, но и дедуктивное решение, что в данном случае означает наличие универсального подхода (алгоритма), способного обеспечить одновременное решение всех задач данного класса, без существенной потери точности и адресности получаемых результатов. Хотя очевидно и то, что такое решение будет корректным только в том случае, если оно осуществляется на прочной теоретической и методической базе. То есть, лежит в рамках той предметно-понятийной схемы (научной дисциплины), к компетенции которой относится рассматриваемый объект исследования. В данном случае обобщенное решение проблемы, несомненно, следует искать в сфере теоретических представлений современной биогеохимии, которые в своей основе были сформулированы фундаментальными трудами В.И. Вернадского (Вернадский, 1928, 1965, 2016), а затем развиты А.П. Виноградовым (Виноградов, 1938, 1949, 1960, 1963), В.В. Ковальским (Ковальский, 1957, 1960, 1974, 1983) и В.В. Ермаковым (1995). Данная теория не только дает возможность надлежащим образом

интерпретировать имеющиеся факты с позиций химического строения биосферы как глобальной динамически уравновешенной системы, эволюционирующей в ходе геологического времени, но и позволяет сформулировать стартовые подходы к обобщенному (дедуктивному) решению названной проблемы токсичности. В настоящей статье предпринята попытка рассмотреть эту проблему именно в биогеохимическом плане и продемонстрировать практическую реализуемость предлагаемого подхода.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Доказательством того, что решение проблемы токсичности может быть осуществлено средствами теоретической биогеохимии служит ряд бесспорных предпосылок.

1. В рамках системного подхода качественная неравнозначность природных объектов недопустима, и в этом отношении свойство токсичности, изначально присущее определенному количеству каких бы то ни было объектов именно как мера вреда, представляет собой чисто антропоцентрическое и научно нестрогое определение.

2. В мире не существует и никогда не существовало объективно токсических (вредных) или полезных элементов или соединений — существуют только биологические эффекты, обусловленные воздействием на тот или иной организм определенных доз вещества, которые специфически проявляют себя в зависимости от вида, формы и продолжительности этого воздействия. Ибо, как справедливо сказал Парацельс: Бог создал человека из вытяжки всего сущего в мире, где все есть яд, и все есть лекарство — дело в дозе.

3. А.П. Виноградов еще в 30-е годы показал, что все организмы несут в себе геохимические отпечатки той среды, в которой они были созданы и в которой постоянно присутствовали практически все элементы таблицы Менделеева (Виноградов, 1938). При этом уже к 60-м годам А.П. Виноградовым, В.В. Ковальским, а далее В.А. Ковдой, А.О. Войнаром и др. по отношению как минимум к 67-ми элементам была доказана физиологическая потребность. Из чего следует неизбежный вывод о том, что отрицательный физиологический эффект, часто равнозначный токсическому отравлению, способен возникать не только от избытка, но и от недостатка тех же самых “токсичных” элементов.

Все дело, действительно, в дозе, и В.В. Ковальский (1974, 1982) хорошо показал это, предложив графическое выражение связи биологических реакций организмов с диапазоном концентраций химических элементов в среде обитания в виде кривой, имеющей не только различные для видов



**Рис. 1.** Характер связи между регуляторными возможностями живых организмов и концентрацией химических элементов в среде обитания: б — средняя оптимальная потребность животных в определенном элементе (по Ковальскому, 1982).

верхний и нижний пороги, но и выраженный экстремум (точку максимума, рис. 1).

4. На протяжении всей истории существования жизни окружающая среда всегда была переполнена самыми разнообразными условно токсическими веществами и соединениями, которые в условиях ненарушенной биосферы всегда представляли собой неотъемлемые компоненты экосистем и наличие которых никак не влияло на жизнеспособность местных биоценозов. Абсолютно все члены местных сообществ были либо полностью адаптированы, либо надежно изолированы от этих воздействий. Так, морская вода смертельна для практически всех обитателей суши, но в то же время она является единственно возможной средой обитания для множества морских организмов; с другой стороны, и природные выходы ториевых моноцитов, и “черные курильщики”, и вода озера Моно с запредельным содержанием мышьяка, представляют собой не более чем предельно плотно занятые экологические ниши.

5. В пределах замкнутой и саморегулируемой системы первичной биосферы (существовавшей до появления мыслящего человека) все природные сообщества могли существовать исключительно на пике своих потенциальных возможностей, причем обязательным условием являлось и наличие идеальной эколого-геохимической ситуации, т.е. абсолютное соответствие биоценоза геохимическим условиям своего существования, поскольку, благодаря максимально жесткой межвидовой конкуренции за пространство, свет и пищевые ресурсы, даже незначительное отклонение

от оптимума неизбежно вело к ослаблению и быстрому замещению любых “слабых звеньев” в пирамиде Либермана.

6. Единственной причиной возникновения и устойчивого существования геохимически спровоцированных токсикозов (эндемических болезней), таких как атаксия, флюороз, борный энтерит и др., явилась возможность сознательного выхода человека за пределы традиционных мест обитания и значительное нарушение им структуры существовавших пищевых цепей. Таким образом, получает объяснение тот факт, что все устойчивые токсические эффекты природного характера проявляли и проявляют себя исключительно по отношению к человеку и интродуцированным видам.

7. Для всех элементов и соединений существует не диапазон, а единственное предельно оптимальное значение концентрации, свойственное первичным природным биоценозам и, реже, группе биоценозов, поскольку отклонение от него в любую сторону уже означает ухудшение состояния, причем значимость отклонения целиком определяется широким комплексом внешних и внутренних факторов.

8. Для каждого из ныне существующих видов животных и растений могут быть определены количественные параметры геохимических условий, являющихся для них абсолютно оптимальными, что представляет собой набор важнейших биогеохимических показателей (констант), знание которых, позволяет минимизировать существующий уровень заболеваемости геохимически спровоцированными болезнями, причем их спи-

сок в настоящее время, по-видимому, еще далеко не полон.

9. В условиях современной ноосферы практически все существующие биоценозы испытывают воздействие значительного количества ксенобиотических соединений техногенного генезиса, многие из которых способны вызывать отрицательные физиологические эффекты, но эти эффекты проявляют себя исключительно в условиях исторически уже существовавшего и не обязательно оптимального природного фона.

10. Поступление техногенного вещества в окружающую среду специфично и в подавляющем большинстве случаев осуществляется из точечных и, реже, линейно вытянутых источников, благодаря чему поля их распространения всегда имеют моно- или полицентрическую структуру, что позволяет достаточно легко воспроизводить и картографировать их пространственную конфигурацию.

11. Геохимические поля техногенного генезиса отличаются относительно малой мощностью, протяженностью и практически всегда позиционируются поверх уже существующих природных геохимических полей (геохимического фона), что дает основание говорить о специфической структурной организации (двуслойности) современной ноосферы.

Совокупность вышеприведенных предпосылок, в свою очередь, позволяет сделать ряд важных выводов.

1. *В природе никогда не существовало и не может существовать абсолютно токсических элементов или соединений — существуют только токсичные дозы, получение которых стало возможным исключительно в результате сознательного нарушения человеком принципов функционирования саморегулируемых систем первичной биосферы.*

2. *В подавляющем большинстве случаев токсические эффекты, вызванные превышением концентрации отдельных веществ и соединений в воде, воздухе и продуктах питания, являются прямым следствием антропогенно спровоцированных трансформаций, имеющих место в результате глубокого изменения способов взаимодействия живых организмов с геохимической средой своего обитания, происходящего на фоне не менее значительной техногенной трансформации самой этой среды.*

3. *В отличие от токсических отравлений заболеваний геохимической природы могут быть обусловлены не только превышением концентрации определенных химических элементов, но могут являться и прямым следствием искусственно созданного дефицита тех же “токсических” элементов, возникающего в результате сознательной минимизации их поступления в пищевые цепи.*

4. *В условиях современной ноосферы геохимическое воздействие окружающей среды на живые организмы в каждой точке пространства определя-*

*ется спецификой интерференции двух генетически различных типов геохимических полей: природного и техногенного.*

5. *Проблема создания универсального алгоритма решения задачи оценки эколого-геохимического качества той или иной территории, относится к числу заведомо решаемых и в предельно общем виде может быть сведена к количественной фиксации разницы между условно идеальным и наблюдаемым состоянием окружающей среды в заданной точке пространства.*

Важным обстоятельством является еще и тот факт, что предлагаемый теоретический подход не имеет явных противопоказаний и позволяет перевести решение проблемы геохимической токсичности в практическую плоскость.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

Практическое решение названной проблемы может быть сведено к созданию специализированной методической процедуры, в рамках которой необходимо:

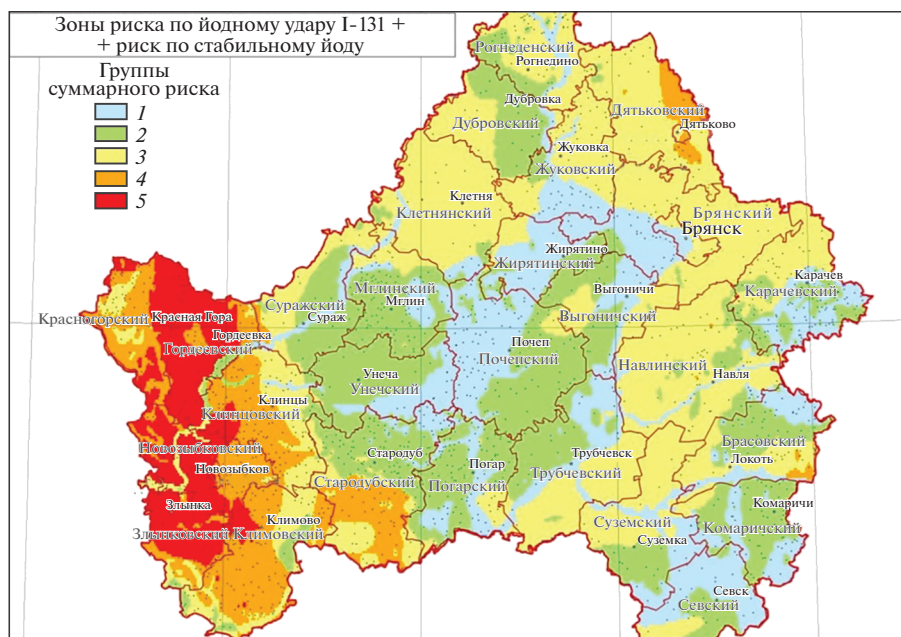
— во-первых, точно определить количественные параметры естественного геохимического оптимума для каждого существующего вида;

— во-вторых, разработать методику, позволяющую максимально точно зафиксировать величину разницы между оптимальным и наблюдаемым геохимическим состоянием природной среды в исследуемой точке пространства;

— в-третьих, разработать методику создания карт, характеризующих вероятность возникновения специфических биологических реакций (рисков), возникающих в результате длительного пребывания организмов в пределах той или иной контролируемой территории.

Положительной предпосылкой в данном случае является достигнутый уровень развития измерительной техники и возможности современных компьютерных средств обработки пространственно распределенной информации, благодаря чему стало возможным почти мгновенное осуществление десятков, а иногда и сотен однотипных анализов, а также автоматизированная обработка и картографическое представление больших объемов такого рода информации.

Теоретической основой для создания методики построения такой карты стала вышеприведенная предпосылка о том, что путем сравнения оптимальной и наблюдаемой величины обеспеченности, можно получить карту комфортности природного геохимического фона, которая путем последующего оверлейного совмещения с картой техногенного воздействия, может быть преобразована в полноценную карту риска, возникающе-



**Рис. 2.** Дифференциация территории по риску заболеваний ЩЖ, провоцируемому “йодным ударом” на фоне йододефицита в почвах. Уровень риска: 1 – минимальный; 5 – максимальный.

го в результате неблагоприятного сочетанного воздействия обоих геохимических факторов.

Уникальная возможность практического построения такой карты представилась в ходе проведения работ по ликвидации последствий чернобыльской катастрофы на территории Брянской области, в пределах которой геохимическое поле стабильного  $^{127}\text{I}$  было кратковременно перекрыто полем техногенного радиоактивного изотопа того же элемента –  $^{131}\text{I}$  (в результате чего возникла ситуация так называемого “йодного удара”).

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Для решения задачи потребовалось сначала создать карту йодного статуса территории, затем картографировать интенсивность “йодного удара” и осуществить оверлейную операцию наложения двух информационных слоев (Берлянт, 1988), после чего на основе данных медицинской статистики провести верификацию полученной карты риска, что также представляло собой серьезную методическую проблему, которая была решена с использованием специализированных ГИС-технологий.

При разработке методики построения легенды к карте сочетанного риска балльные “веса” отдельно взятых факторов геохимического риска (йододефицита и “йодного удара”) первоначально были приняты одинаковыми, что давало возможность упростить решение, но одновременно

позволяло характеризовать и степень выраженности каждого фактора. В результате уровень сочетанного риска был ранжирован на 5 категорий, в соответствии с которыми на карте Брянской области были выделены 5 зон, различающихся между собой по уровню риска возникновения рака щитовидной железы (ЩЖ).

Полученная карта приведена на рис. 2. На ней не только четко представлена зона высокого риска, возникшая в результате радиационного загрязнения западной части Брянской области, но и участки со значительным уровнем риска в северной и восточной частях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема токсичности может быть решена в общем виде на основе базовых теоретических положений биогеохимии и геохимической экологии, что, в свою очередь, открывает путь к решению проблемы минимизации последствий существующих эндемических заболеваний геохимической природы. В статье предложен методологический подход, позволяющий осуществить решение проблемы средствами геоинформационного анализа. Приведенный пример решения указывает на универсальный характер предлагаемого подхода, поскольку не существует объективных препятствий для того, чтобы аналогичное решение не могло быть осуществлено для разных элементов, любых территорий, разных половозрастных групп населения, а также для отдельных видов животных или

растений, причем не только подвергающихся воздействию избытка любых химических элементов и соединений, но и, наоборот, находящихся в условиях критического дефицита биологически значимых микроэлементов.

Разработанные теоретические и методические подходы отвечают современным тенденциям применения геоинформационных технологий в биогеохимии и позволяют создавать медико-геохимические базы данных, пригодные для картографической визуализации и оценки пространственно распределенной эколого-геохимической информации, что в будущем открывает перспективу создания специализированных систем принятия решений, необходимых для безопасной организации селитебных территорий, формирования стратегии естественно-природного эколого-геохимического нормирования и оперативного выявления и профилактики современных микроэлементозов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянт А.М. (1988) Картографический метод исследования. М.: Изд-во Московского университета, 252 с.
- Вернадский В.И. (1926) Биосфера (Очерк первый. Биосфера в космосе. Очерк второй. Область жизни). Л.: Изд-во научно-технической литературы, 146 с.
- Вернадский В.И. (1928) Эволюция видов и живое вещество (доклад на заседании Ленинградского общества естествоиспытателей). *Природа* **3**, 227-250.
- Вернадский В.И. (1965) Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 374 с.
- Виноградов А.П. (1927) Йод в природе. *Природа* **9**, 670-678.
- Виноградов А.П. (1938) Биогеохимические провинции и эндемии. *Доклады АН СССР* **18**(4/5), 283-286.
- Виноградов А.П. Геохимия и биохимия (по работам Биогеохимической лаборатории АН СССР). *Успехи химии* **VII**(5), 656-686.
- Виноградов А.П. (1946) Геохимическая обстановка в районах эндемического зоба. *Известия АН СССР. Серия география и геофизика*. **X**(4), 341-355.
- Виноградов А.П. (1949) Биогеохимические провинции. *Сборник Трудов Юбилейной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения В.В. Докучаева (1945 г.)*. (Гл. ред. акад. Л.И. Прасолов). М.: АН СССР, 59-84.
- Виноградов А.П. (1957) Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 237 с.
- Виноградов А.П. (1960) О генезисе биогеохимических провинций. *Тр. Биогеохим. лаб.* **11**, 3-7.
- Виноградов А.П. (1963) Биогеохимические провинции и их роль в органической эволюции. *Геохимия* **3**, 199-213.
- Войнар А.О. (1960) Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Высшая школа, 544 с.
- Ермаков В.В. (1995) Биогеохимические провинции: концепция, классификация и экологическая оценка. *Основные направления геохимии. К 100-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова. Отв. ред. акад. Э.М. Галимов*. М.: Наука, 183-196.
- Ковальский В.В. (1957) Новые направления и задачи биологической химии сельскохозяйственных животных в связи с изучением биогеохимических провинций. М.: МСХ СССР, 35 с.
- Ковальский В.В. (1960) Биогеохимические провинции и методы их изучения. *Тр. Биогеохим. лаб.* **11**, 8-32.
- Ковальский В.В. (1972) Биологическая роль йода. *Биологическая роль йода*. (Отв. ред. Р.И. Блохина). М.: Колос, 3-32.
- Ковальский В.В. (1974) Геохимическая экология. М.: Наука, 282 с.
- Ковальский В.В. (1978) Геохимическая экология — основа системы биогеохимического районирования. *Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР* **15**, 3-21.
- Ковальский В.В. (1982) Геохимическая среда и жизнь. М.: ГЕОХИ АН СССР, 78 с.
- Государственная почвенная карта СССР [Карты] (1953). Ред.: Л.И. Прасолов, И.П. Герасимов. Масштаб 1 : 1000000. Лист N-36. М.: ГУГК.
- Korobova E.M. (2017) Principles of Spatial Organization and Evolution of the Biosphere and Noosphere *Geochem. Int.* **55**(13), 1205-1282.
- Korobova E., Romanov S. (2017) Toxicity as an Eco-Geochemical Problem. *Goldschmidt Abstracts*, 2100.
- Korobova E.M., Romanov S.L., Silenok A.V., Kurnosova I.V., Chesalova E.I., Beriozkin V.Yu. (2014) Iodine deficiency in soils and evaluation of its impact on thyroid gland diseases in areas subjected to contamination after the Chernobyl accident. *J. Geochemical Exploration* **142**, 82-93.