

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

ЙОД. СВОЙСТВА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

IODINE. PROPERTIES AND OCCURENCE IN THE ENVIRONMENT

Г.Ф. Жукова¹, С.А. Савчик², С.А. Хотимченко¹
G.F. Zhukova¹, S.A. Savchik², S.A. Khotimchenko¹

¹ГУ НИИ Питания РАМН, Устьинский пр., д. 2/14, Москва, 109240 Россия.

²ООО НПФ «Техновита», ул. Ленина, 73, Боровск, Калужская обл., 249010 Россия.

¹Institute of Nutrition RAMS, Ust'insky Proezd Str. 2/14, Moscow 109240 Russia.

²ООО SPF "Technovita", Lenina Str. 73, Borovsk, Kaluga Region, 249010 Russia.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: йод, миграция в окружающей среде.

KEY WORDS: iodine, environmental migration.

РЕЗЮМЕ: В обзоре приведены физико-химические свойства йода и представлены особенности миграции этого микроэлемента в объектах окружающей среды (воде, воздухе, почве, растениях).

ABSTRACT: The review is dedicated to iodine physical-chemical properties and speciality of iodine migration in the environment (water, air, soil, plants).

Йод принадлежит к числу важнейших микроэлементов, принимающих участие в интимных механизмах жизнедеятельности высокоорганизованных организмов. Этот элемент входит в состав тироксина — гормона щитовидной железы, являющегося жизненно необходимым в качестве регулятора роста организма и регулятора скорости обмена веществ. Знаменитый исследователь Глени Сиборг охарактеризовал роль микроэлемента йода великой и поистине космической в появлении, развитии и сохранении жизни на Земле. И эту роль не может взять на себя никакой другой элемент.

Недостаточное поступление йода (суточная потребность в нем составляет всего 100–200 мкг) приводит к заболеваниям щитовидной железы, а также к выраженным нарушениям многочисленных функций различных органов и систем организма. В целом, на Земле в регионах с недостаточностью йода в окружающей среде проживают 1,5 млрд. людей, у 655 млн. из них имеется увеличение щитовидной железы, а у 43 млн. — выраженная умственная отсталость. Йоддефицитные заболевания являются самой распространенной неинфекционной патологией в мире (WHO/UNICEF, 1994; Дедов и др., 2000).

Характерной особенностью соединений йода является его многообразие химических форм, легкость перехода между различными валентными со-

стояниями и достаточно высокая летучесть свободного йода. Уникальные свойства йода и его соединений позволяют этому элементу присутствовать в микро количествах во всех без исключения объектах живой и неживой природы. Соединения йода в различных валентных состояниях обладают различной миграционной способностью и действием на живые организмы, поэтому, при рассмотрении судьбы этого микроэлемента в биосфере необходимо учитывать как его валентные состояния, так и возможные окислительно-восстановительные превращения в конкретных условиях.

Йод — химический элемент, относящийся к VII группе периодической системы элементов Менделеева, открыт в 1881 г французским химиком Куртуа, который назвал его «йодом», от греческого слова «фиолетовый». В природе находится в виде стабильного изотопа с атомной массой 127. Искусственно получены радиоактивные изотопы с атомной массой 125, 129, 131.

Йод относится к подгруппе галогенов, являющихся самыми химически активными неметаллами. Йод проявляет в своих соединениях различные степени валентности: –1; +1; +3; +5; +7. Поскольку молекула йода обладает большим радиусом атома и относительно низкой энергией ионизации, во многих химических реакциях йод может выступать и как акцептор, и как донор электронов. При нормальном давлении и комнатной температуре йод представляет собой фиолетово-черные пластинчатые кристаллы с металлическим блеском, специфическим запахом и удельным весом 4,9 г/см³. Кристаллы состоят из двухатомных молекул (I₂), связанных между собой силами межмолекулярного взаимодействия Ван-дер-Ваальса. При нагревании до 183 °С йод возгоняется, образуя фиолетовые пары, и при

этой температуре йод находится в виде молекулы J_2 , а при повышении температуре более 800°C молекулы йода диссоциируют на атомы (Некрасов, 1968).

Результаты физико-химических исследований свидетельствуют о том, что молекула J_2 в кристаллическом состоянии имеет вид $J^{1+} \dots J^{1-}$. Присутствие в кристалле J^{1+} подтверждено экспериментальными исследованиями спектров поглощения кристаллического йода в сверхрастворителях (диметилформамиде и диметилсульфоксиде). Абсорбционный спектр раствора кристаллического йода характеризуется тремя полосами поглощения при λ 288, 350 и 460 нм. При исследовании абсорбционных спектров раствора кристаллического йода в диметилформамиде в них были обнаружены только две полосы поглощения при λ 288 и 350 нм, что подтверждает строение молекулы J_2 как несимметричной молекулы (диполь), отвечающей структуре $n \times H_2O [J^{1+} \dots J^{1-}]$. Йод при комнатной температуре мало растворим в воде (0,03 г/100 мл), с повышением температуры растворимость его увеличивается незначительно. Гораздо лучше йод растворяется в органических растворителях: в спирте, эфире, сероуглероде (20 г/100 мл); четыреххлористом углероде (2,9 г/100 мл), глицерине (0,97 г/100 мл). Йод хорошо растворяется в водных растворах йодидов. При этом образуется комплексный трийодид-ион, который в химических реакциях проявляет себя как эквимольярная смесь молекулярного йода и йодид-иона (Некрасов, 1968; Мохнач, 1974).

В виде простого вещества йод практически не встречается, в основном его добывают из химических соединений. Известны некоторые минералы йода, образующиеся в биосфере, однако, они очень редки, и не существуют в виде промышленных месторождений.

Йод не взаимодействует с насыщенными органическими соединениями, так как энергия связи углерод-водород больше энергии связи углерод-йод. Йод способен присоединяться к кратным углерод-углеродным связям. Количество йода, способного присоединиться к единице массы органического соединения характеризует степень насыщенности вещества йодом – йодным числом. Йод способен замещать водород в ароматических соединениях (толуол, фенол, нафталин и др.) (Некрасов, 1968).

Важнейшими соединениями йода являются йодиды (соединения отрицательно одновалентного йода), йодаты и йодорганические соединения. В кислом растворе йодид-ион взаимодействует с ионом двухвалентной меди с образованием нерастворимого в воде йодида одновалентной меди и выделением молекулярного йода. В связи с этим, в кислой среде невозможно присутствие одновременно йодид-ионов и ионов двухвалентной меди, а также ионов трехвалентного железа, соединений трех- и четырехвалентного марганца. С другой стороны, молекулярный йод окисляет сульфгидрил-, сульфид-ионы и сероводород при любых значениях pH с образованием йодид-ионов. Окислительно-восстановитель-

ные свойства йода определяют формы нахождения элемента в различных природных системах.

Известны как органические, так и неорганические производные пятивалентного йода. В природе относительно широко распространены соли йодноватой кислоты — йодаты, представляющие собой достаточно устойчивые, бесцветные (если не окрашен катион) кристаллические вещества, хорошо растворимые в воде.

Одной из важнейших форм нахождения йода в объектах биосферы является йод в степени окисления +1. В ряде работ показано, что йод только в степени окисления +1 обладает биологической активностью, в частности антисептическими свойствами. (Мохнач, 1968, 1974). Исследования электронных спектров поглощения водных растворов тироксина позволили предположить, что специфическая гормональная функция тироксина связана с присутствием йода в положительно одновалентной форме (Мохнач, 1974).

Как и все биогенные элементы, йод активно участвует в биогеохимическом кругообороте веществ в природе. Основной кругооборот йода осуществляется между океаном и континентом: океан – атмосфера – почвы – реки – океан. Существование йодного цикла в природе определяется способностью образовывать соединения йода с различной валентностью, обладающие относительной неустойчивостью, высокой растворимостью в воде и летучестью в элементном состоянии (J_2) (Вернадский, 1967; Виноградов, 1967).

Основным резервуаром йода в биосфере является Мировой океан, куда йод был смыт с поверхности почвы ледниками, снегом, дождем и реками. Среднее содержание йода в морской воде составляет около 50–60 мкг/л. Абсолютное содержание йода в **Мировом океане составляет $6,85 \times 10^{16}$ г**. Поступление йода в моря и океаны осуществляется за счет осаднения атмосферы и речного стока, оцениваемого величиной 5×10^{10} г/год. В воде океанов присутствуют йодиды и йодаты примерно в одинаковых количествах (Кашин, 1987; Добровольский, 1998).

Концентрация йода в морской воде зависит от ряда факторов. Обычно уровень содержания йода в морской воде коррелирует с ее соленостью. В северных морях с пониженной соленостью концентрация йода составляет 18–36 мкг/л, в более соленых южных морях (Красное, Средиземное море) – 54–70 мкг/л. С увеличением глубины морей содержание йода возрастает. Это происходит за счет минерализации органического вещества отмирающих растений и животных, а также за счет выноса йода из мантии земли в процессе вулканической деятельности. Иловые воды, формирующиеся на бедных органическим веществом почвах, содержат в 6–9 раз больше йода (160–230 мкг/л), чем океаническая вода, а на богатых органическим веществом илах содержание йода достигает 1000–2300 мкг/л (Вернадский, 1967; Виноградов, 1967; Океанология, 1979).

Поскольку йод образует множество химических соединений, большинство из которых обладают летучестью, то он, наряду с кислородом, углеродом и азотом, относится к основным воздушным мигрантам. Данные о содержании йода в атмосфере весьма противоречивы и колеблются от 0,003 до 12 мкг/м³. Средние концентрации йода в атмосфере над сушей составляют по результатам нейтронно-активационного анализа 0,005–0,01 мкг/м³, что согласуется с данными, приведенными японскими исследователями (Miyake, Tsunogai, 1963; Перельман, 1972; Тихомиров, Русина, 1983). Йод в атмосфере может находиться в трех физических состояниях: в газообразной, жидкой фазах, и в составе твердых аэрозольных частиц, уровень содержания которых зависит от количества в воздухе частиц, абсорбирующих йодистые соединения (Кашин, 1987).

Так как основным источником поступления йода в атмосферу являются моря и океаны, содержание йода в воздухе зависит от факторов, влияющих на испарение его с поверхности воды и на перенос морского воздуха на побережье. Повышение температуры способствует ускорению всех физико-химических процессов, в том числе переходу I₂ в газообразную фазу

Содержание йода в воздухе континентальных областей по сравнению с некоторыми приморскими меняется в 1000 и более раз. Так, при анализе воздуха над побережьем Черного и Азовского морей обнаружено 10–50 мкг йода в 1 м³, в районе Киева — только 1 мкг/м³, а в более отдаленных от моря областях — 0,2 мкг/м³ и менее. Местности, огражденные от океана естественными преградами, обеднены йодом. При исследовании распределения йода в воздухе в зависимости от высоты местности, установлено, что при подъеме на 700 м над уровнем моря концентрация йода в воздухе снижается на половину, на 1000 метров — на 62,5 %.

За 12 часов легкие человека вдыхают до 4000 литров воздуха, в которых может содержаться до 0,044 и более миллиграммов йода, поэтому из воздуха человек способен потреблять до 50 % необходимого ему йода. Воздух приморских областей, насыщенный йодом, благодатен для пышного развития жизни. Известно, что в приморских регионах хлебные злаки дают высокие урожаи, деревья достигают исполинского роста и долговечности, например секвойя вечнозеленая и гигантская достигает высоты 140 м с диаметром стволов до 10 м (Мохнач, 1974; Океанология, 1979).

Из атмосферы йод возвращается в почву с дождевой водой, концентрация йода в которой колеблется в пределах 1,8–8,5 мкг/л. Однако, возвращение йода в почву происходит очень медленно и в относительно малом, по сравнению с предшествовавшей потерей, количестве. Повторные смывы с почвы влекут за собой формирование дефицита йода в окружающей среде. В результате, все растения, произрастающие на такой почве, имеют низкое содержание йода (не более 10 мкг/кг сухого веса). Это

обуславливает тяжелую йодную недостаточность у значительной части населения мира, живущего за счет натурального или полунатурального хозяйства. И это относится не только к странам Африки. Многие жители России тоже обеспечивают свой прожиточный минимум, собирая урожаи с приусадебного или дачного участков, где почва может быть плодородной, но содержать мало йода. В этом заключается одна из основных причин развития йодного дефицита (Перельман, 1972; Тихомиров, Русина, 1983).

По подсчетам геохимиков, содержание йода в земной коре ничтожно мало (до 4×10^{-6} % по массе), тем не менее, этот крайне редкий элемент присутствует всюду. Йод находится в глубоких слоях почвы и обнаруживается в содержимом нефтяных скважин. В целом, чем старше поверхность почвы и чем более она была подвержена эрозии, тем меньше в ней йода. Торфянистые почвы наиболее богаты йодом. Подзолистые содержат мало гумуса и, соответственно, мало йода. В горных районах, особенно в районах выщелоченных подзолистых лесных почв, везде сказывается дефицит йода. Кордильеры, Альпы, Скандинавские горы, Урал, Алтай, Гималаи и др., представляют классические зоны низкого содержания йода в окружающей среде. Наиболее обеднены йодом почвы в горных местностях, которые подвергались частому выпадению дождей и йодсодержащие вещества уносились со стоком воды в реки. Ледники также являются важной причиной потери йода из почвы. (Вернадский, 1967; Виноградов, 1967).

Концентрация йода в почвах различных регионов земного шара изменяется в очень широких пределах: от 0,1 до 40 мкг/кг, хотя в определенных условиях (в прибрежных областях Японского моря) содержание йода может достигать до 135 мкг/кг (Кашин, 1987; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Однако основная масса йода существует не в минеральном виде, а в состоянии рассеяния. Это явление связано с нахождением воды в земной коре. Тот факт, что йод в естественных условиях в биосфере неразрывно связан с водой, подтверждается электронными спектрами поглощения водных растворов молекулярного йода и йода-йодида. Гидратированному аниону I⁻ приписываются полосы поглощения λ 192–193 нм и λ 226 нм. Полосы поглощения λ 290 и 350 нм встречаются не только в водных растворах йода-йодида, но и в других растворителях. Максимум поглощения λ 290 нм характеризует присутствие трийодид-иона (I₃⁻), максимум λ 350–360 нм — оксианион IO⁻ (I⁺), а максимум поглощения λ 450–460 нм указывает на присутствие сольватированной молекулы I₂ · H₂O (I⁺ ... I⁻) (Вернадский, 1967; Мохнач, 1968, 1974).

Концентрация йода в почве определяет содержание этого микроэлемента в местной питьевой воде. Обычно в йоддефицитных регионах количество йода в воде не превышает 2 мкг/л. В отдельных случаях наблюдаются гидрохимические аномалии, где уровень содержания йода в воде достигает 0,5–1,0 г/л.

В России подземные воды иногда служат одним из источников промышленного получения йода, концентрация которого в промышленных водах составляет более 10 мкг/л. (Кашин, 1987).

Объем вод поверхностного и подземного стока составляет небольшую величину от общих мировых запасов воды (2,8 %). Однако они имеют важнейшее значение в миграции химических элементов на суше и поступления йода в организм человека.

Суточное потребление человеком йода с водой крайне мало. Около 90 % усваиваемого организмом йода поступает с продуктами питания, вклад водного и атмосферного пути значительно меньше — около 5 %. Основное количество этого микроэлемента поступает главным образом с продуктами моря и растительными продуктами.

Наиболее высокая концентрация йода присутствует в морской рыбе и морепродуктах (800–1000 мкг/кг). Особенно богаты йодом морские водоросли. Наиболее известная из них — морская капуста *Laminaria* (ламинария). Очень много йода в рыбьем жире (Добровольский, 1998).

Морские водоросли являются классическим примером участия живого существа в кругообороте йода в природе. Особый интерес представляет деятельность живых организмов, которые могут концентрировать йод, находясь в водах океанов. Сравнительное изучение уровня содержания йода в водорослях *Laminaria*, *Fucus* и в морской воде, показало, что концентрация йода в водорослях в 30000 раз выше, чем в воде и достигает 1 % сухого веса водоросли (Мохнач, 1974). Во многих районах суммарное количество пород водорослевого происхождения достигает сотен метров. Эти огромные массы вещества водорослей сохранялись в осадочных породах и постепенно превращались в нефтепроизводящие свиты — керогены. В настоящее время промышленная добыча йода, в основном, имеет два источника сырья: нефтяные воды и морские водоросли (Виноградов, 1967; Перельман, 1972).

Представляет большой интерес механизм процесса извлечения из морской воды йода и накопления его в клетках морских водорослей. Было высказано предположение, что этот процесс протекает по следующему пути. Йодистые соли (преимущественно йодиды), содержащиеся в морской воде, диффундируют через оболочки в клетки водорослей. Ферменты, присутствующие на поверхности клеток, окисляют йодиды (I^{-1}) до молекулярного йода (I_2). Последний, взаимодействуя с водой, дает НЮ, где йод находится в положительно одновалентной форме, в которой он проявляет разнообразную биологическую активность. Таким образом, йод проходит через оболочку растительной клетки в форме НЮ (I^{+1}). На внутренней поверхности клеток водорослей находятся восстановительные ферментные системы, под воздействием которых положительно одновалентный йод (I^{+1}) вновь восстанавливается до йодида (I^{-1}) и, в силу своей нетоксичности, может накапливаться водорослями в очень больших коли-

чествах. Присутствие окислительно-восстановительных ферментных систем на внешней и внутренней поверхности оболочки клеток водорослей объясняет загадочный механизм накопления в них йода (Мохнач, 1968, 1974).

Все без исключения морские водоросли концентрируют йод, но в разной степени (в зависимости от рода, вида и даже в пределах одного и того же вида) от следовых количеств до 0,3 %. Так, *Laminaria japonica*, произрастающая вблизи Владивостока, содержит (в пересчете на сухое вещество) около 0,2 % йода, в Татарском проливе — 0,3 % (Океанология, 1979; Добровольский, 1998).

Еще более сильным концентратом йода являются морские губки. Исключительно богаты йодом губки семейства *Aplysiniidae*, *Euspongiae*, *Hippospongiae* и др. Примечательно, что некоторые из них содержат в своем составе значительное количество 3,5-дийодтирозина (Виноградов, 1967).

Уровень содержания йода в обитателях моря зависит как от степени удаления от берега моря, так и от глубины местообитания: чем глубже живут водоросли, тем больше йода они накапливают. Наблюдаются и сезонные колебания концентрации йода в них, максимум приходится на осенне-летний период, минимум — на зиму.

Не только морские, но и пресноводные водоросли, например *Vaucheria dichotoma*, концентрируют большое количество йода, также как и *Laminaria*, в виде йодида (Виноградов, 1967).

Уровень содержания йода в растительной продукции суши на 2–3 порядка ниже, чем в морепродуктах, и составляет в среднем 0,42 мг/кг (Кашин, 1987; Добровольский, 1998). Такие большие различия в концентрации йода в продуктах моря и суши обусловлены, с одной стороны, генетически детерминированной способностью поглощать и накапливать йод, с другой — доступностью его в источниках поступления. Растения суши способны усваивать лишь «водорастворимый» йод, содержание которого варьирует от 1 до 25 % в зависимости от типа почв (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В дерново-подзолистых почвах подвижность йода относительно высока. В богатых органическим веществом черноземах «водорастворимый» йод составляет около 1 % от валового (Тихомиров, Русина, 1983). Близкие значения доступного йода установлены и для торфяных почв. В сильноподзолистой почве присутствуют лишь следы «водорастворимого» йода. Приморские почвы также отличаются низким содержанием легкоусвояемой формы этого микроэлемента. Однако, в приморских районах помимо почвы, источником йода для растений является атмосферный йод (Зырин, Имади, 1967; Плотникова, Комисаров, 1987).

Установлено повышенное содержание йода в растениях в начале вегетации и снижение — в середине и в конце. Такие различия данных по сезонной динамике объясняются различиями в механизме йодного обмена у растений, которое предполагает

как поглощение йода растениями, так и выделение его в окружающую среду корневой системой и листовой поверхностью (Тихомиров, Русина, 1983). Выделение йода может быть следствием того, что его значительная доля находится в растениях в виде свободных ионов, которые слабо удерживаются протоплазмой и клеточным соком (Эпштейн, 1968). Помимо этого, йод в растениях находится в связанном с органическими соединениями состоянии, а также в адсорбированном виде (Кашин, 1987).

В современном растениеводстве используется большое количество агрохимических приемов воздействия на систему «почва – растение», направленных на повышение количества и качества конечной продукции. Вместе с этим установлено, что если внесение фосфорных и калийных удобрений не влияют на накопление йода культивируемыми растениями, то азотные удобрения, напротив, снижают усвоение йода, поступающего из почвы. Содержание йода (мг) в некоторых продуктах растениеводства, выращенных по стандартной технологии, в пересчете на кг воздушно-сухого вещества составляет: в зерне пшеницы — 0,44; зерне ржи — 0,60; зерне ячменя — 0,58; капусте — 0,85; моркови — 0,51; картофеле — 0,60; кукурузе — 0,47; томатах — 1,86 мг/кг (Кашин, 1987).

Применение йодистых микроудобрений способствует существенному повышению йода в выращиваемой продукции. В опытах на ряде сельскохозяйственных растений изучена целесообразность использования разных форм йодистых микроудобрений, в частности, йода в форме I_2 , KI и KIO_3 . Было установлено, что внесение в почву микроэлемента в форме I_2 в повышенных дозах оказывает большее токсическое действие, чем йодид-ион, йодат же обладает слабым отрицательным действием на растения. Поглощение микроэлемента в форме йодид-иона 2,3–6,7 раза выше, чем в форме йодат-иона. Наибольший эффект от внесения йодистых микроудобрений был достигнут на овощных культурах, но и зерновые достаточно отзывчивы на внесение йодистых микроудобрений (Кашин, 1987).

Прежде чем продукция растениеводства попадает на стол потребителю, она проходит длинный путь, начиная с технологической переработки, последующего хранения и кулинарной обработки. При этом, в силу легкости перехода йода из одного валентного состояния в другое и летучести молекулярного йода, содержание его в продуктах уменьшается.

Исследования влияния хранения на содержание йода в растительной продукции показали, что при выдерживании моркови в течение 3,5 месяцев потери йода составили 24 %, а через 8 месяцев — 60 %. При сохранении лука в аналогичных условиях потери йода составили 77 %. Не лучше обстоит дело с другими овощами. Хранение картофеля в течение 3,5 месяцев приводит к потере 23 % йода, увеличение срока до 5 месяцев приводит к снижению содержания йода на треть. За полгода нахождения корнеплодов на складе овощи теряют в среднем около

половины содержащего в них йода (Леонов, Терентьева, 1962; Апре, 1975).

В зерне пшеницы при хранении в течение нескольких месяцев уровень йода снижается до половины. Морская капуста, рекомендуемая обычно для профилактики йодной недостаточности, также теряет значительное количество йода, причем процент потерь зависит от способов высушивания, сроков и условий хранения. Аналогичная картина наблюдается и при хранении рыбопродуктов.

Потери йода из рыбы зависят от способа ее обработки. Максимальная сохранность микроэлемента отмечалась для слабосоленой рыбы — в пределах 87 %, копченой рыбы — 68–84 %, потери йода из сильносоленой рыбы составляли 36 %. Наибольшее снижение содержания йода наблюдалось при замораживании рыбных и мясных продуктов. При однократном замораживании наблюдается потеря половины содержащего в продукте йода. Размораживание с повторным замораживанием продукта приводит к полному исчезновению йода. Такое явление можно объяснить, по-видимому, тем, что при замораживании и размораживании разрушаются клеточные мембраны, что приводит к потере йода, находящегося не только в межклеточном пространстве, но и внутри клеток (Гуревич, 1965).

Кулинарная обработка продуктов ведет к обеднению их йодом, иногда еще в большей степени, чем при их хранении. При жарке яиц потери йода составляют 8–14 %, при варке всмятку — 13 %, при варке вкрутую — до 40 %. Варка мяса приводит к утрате половины йода, при жарке потери достигают двух третей от первоначального уровня. Жареные продукты содержат меньше йода, чем аналогичные вареные. Так потери йода при варке мяса составляли 48,3 %, а при жарке они достигли 65,4 % (Мищенко и др., 1956). В целом, содержание йода в пищевых продуктах тем меньше, чем больше они хранятся перед приготовлением и чем более сильному и длительному термическому воздействию они подвергаются в процессе технологической переработки и приготовления пищи. Таким образом, для сокращения потерь йода необходимо свести к минимуму время хранения и интенсивность обработки пищевых продуктов.

Литература

- Апре А.Я. 1975. Динамика содержания йода в лугопастбищной растительности в зависимости от вегетации // Корма и кормление. С.34–44.
- Вернадский В.И. 1967. Геохимия йода и брома. М.: Наука. 240 с.
- Виноградов А.П. 1967. Введение в геохимию океана. М.: Наука. 308 с.
- Гуревич Г.П. 1965. Содержание йода в различно обработанной морской рыбе // Вопросы питания. № 5. С.72–73.
- Дедов И.И., Свириденко Н.Ю., Герасимов Г.А. 2000. Оценка йодной недостаточности в отдельных регио-

- нах России // Пробл. эндокринологии. Т.6. С.3–7.
- Добровольский В.В. 1998. Основы биогеохимии. М.: Химия. 288 с.
- Зырин Н.Г., Имади Т.Х. 1967. Йод в некоторых почвах русской равнины и Крыма // Агрохимия. № 1. С.100–116.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Госагропром. 128 с.
- Кашин В.К. 1987. Биогеохимия, физиология и агрохимия йода. Л.: Наука. 290 с.
- Леонов В.А., Терентьева М.В. 1962. Пути обогащения растительных и животных продуктов недостающими микроэлементами // Микроэлементы и естественная радиоактивность почв. С. 196–199.
- Мищенко В.М., Гуревич Г.П., Межвинская З.М. 1956. Содержание йода в пищевых продуктах Закарпатской области и его потери при кулинарной обработке // Врачебное дело. № 6. С.633–639.
- Мохнач В.О. 1968. Теоретические основы биологического действия галоидных соединений. Л.: Наука. 320 с.
- Мохнач В.О. 1974. Йод и проблемы жизни. Л.: Наука. 283 с.
- Некрасов Б.В. 1968. Основы общей химии М.: Химия. 478 с.
- Океанология. 1979. Химия океана. Т.2. Геохимия донных осадков. / Отв. ред. И.И.Волков. М.: Наука. 536 с.
- Перельман А.И. 1972. Геохимия микроэлементов в зоне гипергенеза. М.: Мир. 196 с.
- Плотникова З.М., Комисаров Н.Д. 1987. Содержание йода в низинных торфах Северного Зауралья и его распределение по компонентам органического вещества // Агрохимия. № 7. С.83–88.
- Тихомиров Ф.А., Русина Т.В. 1983. Атмосферный и почвенные пути поступления йода в наземную массу травянистых растений // Агрохимия. № 5. С.92–96.
- Эпштейн Э. 1968. Биохимия растений. М.: Наука. 261 с.
- Miyake G., Tsunogai S. 1963. Evaporation of iodine from the ocean // Geophys. Res. Vol.68. P.3989–3993.
- WHO/UNICEF. 1994. International Council for the Control of Iodine Deficiency Disorders Indicators iodine deficiency disorders and their control through salt iodination. Geneva: WHO.