

УДК 631.83:631.46

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ФОНДА ЙОДА В АГРОЦЕНОЗАХ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Г. А. Конарбаева^{1,*}, В. С. Бойко², В. Н. Якименко¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

²Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

*E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

В многолетних стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири показаны изменения почвенного фонда йода в условиях агроценозов. Определено содержание в почвах валового и водорастворимого йода, выявлена связь этих показателей с почвенным содержанием гумуса и гранулометрическим составом. В целинном состоянии более тяжелая и гумусированная лугово-черноземная почва содержала валового йода в 3–4 раза больше, чем целинная серая лесная почва; при этом уровень водорастворимого йода в обеих почвах практически не отличался и находился на оптимальном уровне – 0.05–0.06 мг/кг. При длительном интенсивном выращивании картофеля, овощных и зерновых культур почвенное содержание доступного растениям йода существенно снизилось, перейдя в класс низкой обеспеченности.

Ключевые слова: почва, агроценоз, удобрения, урожайность, валовой и водорастворимый йод.

DOI: 10.31857/S0002188122120080

ВВЕДЕНИЕ

Йод является одним из основных элементов в процессе формирования биогеохимического круговорота в системе почва–природные воды–растения–животные–человек. В связи с этим изучение его поведения в объектах природной среды, прежде всего в почвах и растениях, становится все более значимым [1–3].

Важная биологическая роль йода, которую он играет в живых организмах, связана с регулированием этим галогеном скорости обмена веществ в них. Йод входит в состав гормонов щитовидной железы – тироксина и трийодтиронина. Его физиологическая функция в этих гормонах незаменима. Атомы йода в гормонах щитовидной железы участвуют в процессе переноса электронов благодаря переходам их из состояния I^+ в I^- и обратно [4].

Дефицит йода, так же, как и его избыток, приводит к тяжелым заболеваниям, таким как гипотериоз, эндемический зоб, болезнь Хашимото и другим [2, 5, 6].

Получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур невозможно без использования

минеральных удобрений, на долю которых приходится не менее 1/3 прибавки урожая. Более того, применение минеральных удобрений – один из главных факторов эффективного функционирования агроценозов, обеспечивающий активный баланс химических элементов в системе почва–растение. Поэтому необходимо изучение содержания йода в почвах, используемых в полеводстве, на наш взгляд, т.к. регулярно вносимые в почву минеральные удобрения способны влиять на изменение содержания галогена в системе почва–растение.

При оценке значимости того или иного элемента в почвах ценную информацию представляет не только знание его валового содержания, но и концентрация подвижных форм, т.к. растения способны из них поглощать необходимые элементы питания. Тем более, что по величине валового содержания элементов, в том числе и йода, сложно судить об экологической ситуации в агроценозах. По мнению Ильина [7], учет только валового содержания следует признать малопригодным при агрохимической и тем более экологической оценке почв. Это связано с тем, что даже на загрязненных почвах в силу их буферных

свойств и защитных функций растений, можно получать чистую продукцию. В этом аспекте большую роль играет изучение водорастворимой формы йода. Согласно критериям, предложенным Покатиловым [8], содержание водорастворимого йода в почвах в диапазоне 0.01–0.03 – низкое, 0.03–0.05 – пониженное, 0.05–0.10 мг/кг – оптимальное. Содержание водорастворимой формы йода в пахотных почвах юга Западной Сибири, варьирующее в интервале от следовых количеств до 0.03 мг/кг, за исключением черноземов, где оно изменяется в диапазоне от 0.03–0.05 мг/кг, можно считать низким и пониженным.

Цель работы – в длительных стационарных полевых опытах оценить изменение почвенного фонда йода в агроценозах лесостепи Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использованы почвы лесостепной зоны Западной Сибири: серая лесная – северная лесостепь и лугово-черноземная – южная лесостепь. В полевом опыте, заложенном на серой лесной почве в 1988 г. на стационаре ИПА СО РАН (Искитимский р-н Новосибирской обл.), до 2000 г. выращивали овощные культуры в севообороте, а затем картофель бессменно. В исследовании рассматривали контрастные варианты данного опыта: без удобрений, NP и NPK. Удобрения вносили в форме N_{aa} , P_{cd} и K_x ежегодно с учетом потребности выращиваемой культуры. Закладку и проведение опытов осуществляли по общепринятой методике. Повторность опытов четырехкратная.

Полевой опыт на лугово-черноземной почве был заложен более 40 лет назад (в 1978 г.) на стационаре СибНИИСХоза (Омский р-н Омской обл.). На одном из полей 8-польного севооборота в большинстве лет выращивали многолетние и однолетние травы и травосмеси, на другом – зерновые и однолетние кормовые культуры. Повторность опытов также трех–четырёхкратная. Рассматриваемые в данном исследовании варианты опыта: без удобрений и вариант NP. Калийные удобрения из-за высокого содержания калия в почве не использовали (содержание обменного калия >60 мг/100 г). Побочную продукцию – солому при уборке зерновых разбрасывали по полю.

Агрохимический анализ почв проведен по стандартным методикам. Определяли pH – потенциометрическим методом, гранулометрический состав – по Качинскому, гумус – по Тюрину, валовой йод – кинетическим роданидно-нитритным методом по Проскуряковой [9]. Для определения водо-

растворимой формы йода использовали водную вытяжку в соотношении почва : вода = 1 : 4 и временем взаимодействия 4 ч с последующим центрифугированием. Растительные образцы на содержание йода также проанализированы по известной методике [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая картина урожайности культур за годы исследования сложилась таким образом, что во всех вариантах без удобрений урожайность была заметно меньше, чем в вариантах с удобрениями (табл. 1), что было вполне ожидаемо. Очевидно, что в вариантах без удобрений сформировался глубокий отрицательный баланс всех питательных веществ, что негативно отразилось на эффективном плодородии почвы и урожайности культур. Например, в варианте NP на серой лесной почве урожайность была меньше, чем в варианте NPK на 35%, что указывало на то, что сбалансированное внесение минеральных удобрений существенно повышало урожайность культур.

Урожайность культур в кормовом и зернотравяном севооборотах в вариантах NP на лугово-черноземной почве за годы наблюдений превышала вариант без удобрений соответственно в 1.36 и 1.50 раза, что также подтверждало роль минеральных удобрений. При этом в кормовом севообороте было внесено больше фосфора в 1.4 раза, а в зернотравяном было внесено больше азота в 1.1 раза. Полученные данные урожайности культур свидетельствовали о том, что такое различие во внесенных дозах азота и фосфора не оказало заметного влияния на урожайность культур в удобренных вариантах. Продуктивность культур за длительный период проведения опытов в вариантах без удобрений как в кормовом, так и зернотравяном севооборотах составила 34–37 ц/га, а при внесении NP-удобрений – 53–55 ц к.е./га, что еще раз подчеркнуло их значимость.

Несмотря на малые количества по абсолютной величине выносимого урожаем йода, его многолетний отрицательный баланс также может привести к дефициту элемента в интенсивных агроценозах. По нашим данным, содержание йода в клубнях картофеля на серой лесной почве за годы наблюдений составило в варианте без удобрений 0.040–0.042, в варианте NP – 0.041–0.043, в варианте NPK – в 2 раза больше (0.089 мг/кг). Другими словами, в первых 2-х вариантах содержание йода в растениях соответствовало уровню содержания водорастворимого йода в почве. Полученные результаты в 3-м варианте свидетельствовали о том, что сбалансированное по удобрениям пи-

Таблица 1. Общая урожайность культур и поступление макроэлементов с минеральными удобрениями в длительных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири

Вариант	Суммарная урожайность, ц к.е./га	Внесено с удобрениями кг д.в./га		
		азот	фосфор	калий
Серая лесная почва				
Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.)				
Без удобрений	2030	–	–	–
NP	2370	4020	2300	–
NPK	3630	4020	2300	6300
Лугово-черноземная почва				
Кормовой севооборот (1978–2021 гг.)				
Без удобрений	1610	–	–	–
NP	2200	2830	3390	–
Зернотравяной севооборот (1978–2021 гг.)				
Без удобрений	1470	–	–	–
NP	2210	3230	2900	–

тание картофеля способствует увеличению содержания йода в клубнях в количестве, превышающем концентрацию водорастворимого йода в почве.

Содержание галогена в ботве (нетоварной части урожая) за годы наблюдений в вариантах без удобрений и NP находилось примерно на одном уровне с клубнями (соответственно 0.043 и 0.044 мг/кг). В варианте NPK его содержание резко возросло до 0.112 мг/кг. Полученные данные свидетельствовали о более активном поглощении йода зеленой массой растений в сравнении с клубнями. Можно предположить, что увеличение концентрации легкорастворимых солей (KCl) в варианте NPK усиливало доступность йода почвы. Кроме того, все приведенные данные указывали и на то, что в питании растений принимают участие и другие подвижные формы галогена, в частности солерастворимая.

Исходя из полученных данных, можно говорить о том, что в надземной части растений более высоким содержанием йода характеризуются листья. Согласно данным [10], в опытах с изотопом ¹²⁵I органы и части растений овса можно расположить в следующий убывающий ряд: стебли—листья—метелки. В другом опыте в обычных условиях, без применения йодистых соединений показано, что в распределении йода по органам овса наблюдали похожую закономерность: корни—листья—стебли—зерно [11]. По мнению Кашина [11], различия в содержании йода по органам растений обусловлены высокой избирательной способностью клеточных мембран, расположенных на границе раздела органов, к пропусканию раз-

личных ионов и молекул. А на границе корень—стебель существует наиболее сильный физиологический барьер. Считая данное предположение вполне допустимым и логичным, хотелось бы высказать еще одно предположение, связанное с плотностью среды, в которой перемещаются анионы йода. Чем большей плотностью обладает среда, тем в ней, по-видимому, активнее закрепляются и труднее перемещаются анионы йода. Поэтому в орошаемой лугово-черноземной почве, где плотность среды несколько меньше, следовательно, йод, вероятно, активнее поступает в листья, чем на серой лесной почве. Уменьшение доступности йода растениям может быть обусловлено фиксацией его почвой и снижением потребности растений в элементе в процессе их развития.

Длительное сельскохозяйственное использование серой лесной и лугово-черноземной почв в полевых опытах естественно оказало свое влияние на некоторые физико-химические свойства (табл. 2). Известно, что содержание йода в почвах контролируется в основном несколькими факторами: содержанием гумуса и илистой фракцией, реакцией почвенной среды и водным режимом. В нашем исследовании было выявлено, что наибольшей способностью к поглощению йода обладает гумусовый горизонт, а более слабой — нижние горизонты, что было вполне ожидаемым, т.к. йод связывается ими преимущественно по механизму сорбции [12]. Полученные в данном исследовании результаты наглядно подтвердили это как на примере лугово-черноземной, так серой лесной почв. Во всех вариантах содержание гумуса и валового йода было больше в слое 0–20 см,

Таблица 2. Изменение почвенных свойств и содержания йода при сельскохозяйственном использовании почв

Вариант	Слой почвы, см	Физическая глина	Ил	Гумус	рН _{Н₂О} , ед. рН	Валовой йод	Водорастворимый йод
		%				мг/кг	
Лугово-черноземная почва							
Целина (исходное)	0–20	43.8	12.8	6.5	6.8	4.56	0.06
	20–40	42.2	20.2	5.4	6.8	4.19	0.04
Многолетние травы (1978–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	42.5	12.9	6.2	7.1	4.27	0.04
	20–40	44.2	20.1	5.6	7.1	4.19	0.03
NP	0–20	46.3	13.1	6.6	7.0	5.06	0.05
	20–40	43.4	20.3	5.2	6.9	4.80	0.04
Зерновые культуры (1978–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	42.1	13.2	6.4	7.0	4.83	0.03
	20–40	43.2	20.3	5.5	6.8	4.74	0.03
NP	0–20	45.3	13.8	6.7	7.2	4.42	0.03
	20–40	44.1	20.8	5.6	7.0	4.10	0.02
HCP ₀₅		3.4	1.4	0.3	0.2	0.41	0.015
Серая лесная почва							
Целина (исходное)	0–20	30.8	17.4	4.9	7.3	1.19	0.04
	20–40	31.4	18.4	2.4	7.2	0.97	0.05
Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.)							
Без удобрений	0–20	32.5	18.4	3.0	7.1	1.20	0.02
	20–40	31.7	18.5	1.7	7.1	0.47	0.05
NP	0–20	33.6	18.3	3.1	6.7	1.54	0.03
	20–40	32.8	19.2	1.3	7.0	0.88	0.04
NPK	0–20	33.7	19.8	3.4	6.8	1.42	0.01
	20–40	32.7	19.3	1.6	6.9	1.12	0.03
HCP ₀₅		2.7	1.2	0.4	0.2	0.15	0.012

при этом диапазон изменения содержания гумуса был более значителен, чем содержание валового йода (табл. 2).

Гумусовое вещество содержит ≈15 различных видов функциональных групп [13], из которых наиболее важными для взаимодействия с йодом являются гидроксильные, карбоксильные, карбонильные, фенольные и аминогруппы. Гидроксильная группа карбоновых кислот легко замещается анионом йода с образованием галоидангидридов кислот, ненасыщенные карбоновые кислоты реагируют с йодом по двойной связи. Фенол и его производные взаимодействуют с йодом весьма активно, т.к. водород гидроксильной группы очень подвижен.

При взаимодействии ароматических соединений с галогенами они связываются наиболее прочно при внедрении в бензольное кольцо. Аро-

матическая составляющая фульвокислот заметно меньше (26%), чем у гуминовых кислот (39%) [14]. Кроме того, повышенное содержание кислорода в фульвокислотах (до 45–50%) в сравнении с гуминовыми кислотами (до 32–38%) [13] должно, по нашему мнению, препятствовать их взаимодействию с йодом из-за возможного электростатического отталкивания между отрицательно заряженными анионами кислорода и йода.

Минеральные компоненты почвы реагируют с йодом по механизмам сорбции, окклюзии, реакциям комплексообразования и обмена. Но по способности концентрировать йод они уступают органическому веществу, т.к. сорбции может сопутствовать десорбция, а химическому взаимодействию – различные параллельные реакции.

Содержание гумуса в изученной лугово-черноземной почве в результате многолетнего сель-

скохозыяственного использования изменилось незначительно, что по-видимому, было связано с большой долей орошаемых многолетних трав и других кормовых культур в структуре посевов и как следствие – поступлением в нее большого количества корневых и пожнивных остатков. Что касается серой лесной почвы, то в этом случае ситуация складывалась иначе. В сравнении с вариантом целины в вариантах без удобрений, NP и NPK произошло заметное снижение содержания гумуса, что по нашему мнению, связано с длительной минерализацией органического вещества почвы при небольшом поступлении растительного материала.

Содержание физической глины и илистой фракции в профиле исследованных почв изменялось незначительно. В исходной серой лесной почве (вариант целины) содержание физической глины составляло 30.8%, а в остальных вариантах оно было несколько больше. Другими словами, отмечена некоторая слабая тенденция к утяжелению ее гранулометрического состава.

В лугово-черноземной почве в варианте целины содержание физической глины в слое 0–20 см было чуть больше, чем в вариантах современной почвы без удобрений. В вариантах NP ее содержание повысилось более заметно. Таким образом, в этой почве также произошло небольшое утяжеление гранулометрического состава.

Что касается содержания илистой фракции, то во всех вариантах в слое 0–20 см оно практически было одинаковым (12.8–13.8%), но в слое 20–40 см оно было значительно больше по абсолютной величине, а диапазон изменения был такой же незначительный – от 20.1 до 20.8%.

Некоторое утяжеление гранулометрического состава пахотного слоя почв происходило, как мы полагаем, за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной фракции, кроме того, в лугово-черноземной почве этому возможно способствовало и многолетнее орошение. Необходимо также отметить, что активная сорбция йода была характерна для горизонтов, обогащенных тонкодисперсными частицами, а также оксидами и гидроксидами алюминия и железа и карбонатных горизонтов [15, 16].

Реакция почвенной среды серой лесной почвы в варианте без удобрений была примерно такой же, как в варианте целины: соответственно от 7.1 до 7.3. В вариантах NP и NPK величина pH была чуть ниже за счет систематического внесения удобрений (табл. 2).

Что касается лугово-черноземной почвы, то в исходном варианте целины pH был чуть более

кислым в сравнении с серой лесной почвой, в остальных вариантах величина pH была почти аналогичной pH серой лесной почвы.

Различия в водном режиме изученных почв было связано с периодическим промывным режимом в серой лесной почве и влиянием поливных и грунтовых вод в лугово-черноземной почве. Кроме того, во время дождей большая часть йода смывается именно дождевыми потоками.

В целом поведение йода в почве зависит от его химических форм и свойств почвы [17, 18], а мобильность галогена – от величины pH, типа почвы и ионного состояния [19]. Таким образом, наши исследования находятся в тренде с зарубежными работами.

Содержание валового йода в лугово-черноземной почве было изначально больше, чем в серой лесной почве, примерно в 4 раза, что обусловлено как повышенным содержанием гумуса в нем, так и физической глины. Давно экспериментально установлено, что гуминовые кислоты способны концентрировать до 88% йода, а фульвокислоты – только 12% [20].

Несмотря на большое число возможностей йода быть связанным различными компонентами почвы, в реальности его концентрация в почвах самая низкая среди галогенов. Это связано с устойчивостью аниона I_3^- , которая намного больше, чем у остальных галогенов, к тому же большинство реакций с участием йода являются эндотермическими [21]. Необходимо также отметить, что многочисленными экспериментами установлено, что органическое вещество активно и прочно связывает йод [22], вследствие чего поток элемента в растения может быть значительно ослаблен.

По нашему мнению, для объективной оценки складывающейся ситуации по действию различных химических элементов, содержащихся в почве, на выращиваемую продукцию, необходимо изучить концентрацию их подвижных форм. Ведь именно подвижные формы формируют геохимическую ситуацию и обеспечивают поток химических элементов в растения и далее в животных и человека. В то же время стоит отметить, что подвижные формы не могут быть полностью освоены растительностью. Существует ряд процессов, препятствующих этому, такие как реакции образования труднорастворимых и комплексных соединений с участием изученного элемента, защитные возможности самого растения и свойственная ему избирательность в поглощении химического элемента. Помимо защитных механизмов в растениях работает и механизм избирательного отношения к ионам, который обеспечи-

вает более интенсивное поглощение дефицитного элемента и активное задержание избыточных. За счет этих, параллельно идущих процессов в растениях поддерживается необходимый элементный химический состав. Вот почему очень важным является изучение подвижных форм галогена и, прежде всего, водорастворимой формы.

Несмотря на довольно значительное различие в содержании валового йода в лугово-черноземной почве и серой лесной, содержание водорастворимой формы йода в них следует отнести к низким и пониженным по градации Покатилова. Только в вариантах целины обеих почв отмечено оптимальное содержание водорастворимой формы йода — 0.05 мг/кг, при этом в лугово-черноземной почве — в слое 0–20 см, а в серой лесной — в слое 20–40 см. По-видимому, это было связано с особенностями водного режима почв. Еще в 2-х случаях отметили оптимальное содержание водорастворимого йода: в варианте NP в слое 0–20 см лугово-черноземной почвы и в варианте без удобрений в слое 20–40 см. Выявленное низкое содержание водорастворимого йода в почве могло свидетельствовать и о незначительном содержании галогена в выращиваемых сельскохозяйственных культурах.

Рассчитав коэффициенты корреляции и детерминации между содержанием гумуса и валового йода, получили следующие результаты: для серой лесной почвы $r = 0.57$ и 0.32 , для лугово-черноземной — $r = 0.37$ и 0.14 . Коэффициенты корреляции (r) и детерминации (d_{yx}) между следующими показателями гумус-водорастворимый йод оказались равными для серой лесной почвы — 0.29 и 0.08, для лугово-черноземной почвы — 0.36 и 0.13. Величины r и d_{yx} между содержанием физической глины и валового йода оказались равными для первой почвы — 0.54 и 0.29, для второй — 0.44 и 0.19. В целом корреляционная зависимость между признаками была средней. Это было ожидаемым, т.к. содержание галогена было достаточно низким, особенно водорастворимого йода, кроме того, имелось много факторов, влияющих на его содержание; доля тех изменений, которые зависели от изученного фактора, была более выражена в серой лесной почве.

В целом исследование показало, что снижение в почве уровня доступного для растений йода было прямо пропорционально продуктивности агроценозов, соответствующим образом нарастал и йодный дефицит. Известно, что основной источник поступления йода в почву — атмосфера, содержание галогена в которой определяется близостью к океану [3]. В этой связи масштабы и сама

вероятность поступления йода во внутриконтинентальные регионы достаточно неопределенны. Несмотря на малые абсолютные количества выносимого урожаем йода, его многолетний отрицательный баланс может привести к дефициту этого микроэлемента в интенсивных агроценозах, что обуславливает очевидную необходимость мониторинга его содержания как в почвах, так и в растительной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, проведенное в многолетних стационарных полевых опытах на серой лесной и лугово-черноземной почвах в лесостепной зоне Западной Сибири, показали, что длительное сельскохозяйственное использование почв может существенно влиять на почвенный фонд йода.

Полученные результаты демонстрировали отчетливую зависимость между содержанием валового йода в почве, с одной стороны, и ее гумусированностью и гранулометрическим составом, с другой. В целинном состоянии более тяжелая и гумусированная лугово-черноземная почва содержала валового йода в 3–4 раза больше, чем целинная серая лесная почва. В то же время уровень содержания водорастворимого йода в обеих целинных почвах практически не отличался и находился на оптимальном уровне — 0.05–0.06 мг/кг.

Многолетнее сельскохозяйственное использование почв, как экстенсивное, так и интенсивное, слабо отразилось на содержании валового йода в пахотном и подпахотном почвенном слоях. При этом в интенсивных агроценозах с повышенной урожайностью выращиваемых культур содержание водорастворимого йода в верхних почвенных слоях существенно снизилось (на 50% и более), свидетельствуя о переходе исследованных почв в класс низкообеспеченных этим микроэлементом. В этой связи в интенсивном земледелии дополнительный контроль уровня йода в почвах и растениях является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 438 с.
2. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 495 с.
3. Кашин В.К. Биогеохимия, физиология, агрохимия йода. Л.: Наука, ЛО, 1987. 260 с.
4. Мохнач В.О. Теоретические основы биологического действия галоидных соединений. Л.: Наука, ЛО, 1968. 297 с.

5. Ковальский В.В. Биологическая роль йода // Биологическая роль йода. Научн. тр. ВАХНИЛ. М.: Колос, 1972. С. 3–32.
6. Longombe A.O., Geelhoed G.W. Iodine deficiency and Intertility in Northeast Zaire // Nutrition. 1997. V. 13. P. 342–343.
7. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
8. Покатилов Ю.Г. Биогеохимия биосферы и медико-биологические проблемы. Новосибирск, 1993. 165 с.
9. Проскуракова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств йода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. № 7. С. 140–143.
10. Пристер Б.С., Григорьева Т.А., Перевезенцев В.М. Поведение йода в системе почва–растение // Агрохимия. 1979. № 3. С. 93–99.
11. Кашин В.К. Влияние форм и доз йодистых соединений на продуктивность и накопление йода растениями овса // Агрохимия. 1984. № 8. С. 101–107.
12. Конарбаева Г.А., Якименко В.Н. Поглотительная способность серой лесной почвы по отношению к йоду // Агрохимия. 2019. № 2. С. 52–59.
13. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 360 с.
14. Конарбаева Г.А., Смоленцев Б.А. Пространственно-генетические особенности распределения йода в почвах Западной Сибири // Агрохимия. 2018. № 7. С. 85–96.
15. Duborska E., Martin U., Martin S. Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status // Agronomy. 2020. V. 10. P. 1574–1585.
16. Schnitzer M. Recent findings of the characterization of substances extracted from soils from widely differing climatic zones // Soil Organic Matter Studies. Proc. Symp. of Braunschweig 6–10 September, 1976. Vienna, 1977. P. 117–132.
17. Muramatsu Y., Wedepohl K.H. The distribution of iodine in the Earth crust // Chem. Geol. 1998. V. 147. P. 201–216.
18. Hu Q., Moran J.E., Blackwood V. Geochemical cycling of iodine species in soils. Lawrence Livermore National Lab., Livermore, CA (United States), 2007. № UCRL-BOOK-234137.
19. Zhang S., Chen Xu, Danielle G. et al. Iodine–129 and iodine–127 in groundwater at the Hanford Site, U.S. IODATE Incorporation into Calcite // Environ. Sci. Technol. 2013. P. 7–14.
20. Дарер Р.С., Мазурова А.Л., Мун А.И. Некоторые данные о формах нахождения брома, йода и бора в озерных осадках и почвах // Изв. АН КазахССР. Сер. химия. 1966. № 4. С. 8–12.
21. Некрасов В.В. Основы общей химии. М.: Химия, 1973. Т. 1. 656 с.
22. Плотникова З.М., Комиссаров И.Д. Взаимодействие гуминовых кислот с йодом // Биол. науки. 1991. № 10. С. 62–65.

Changes in the Soil Fund of Iodine in the Agrocenosis of the Forest-Steppe of Western Siberia

G. A. Konarbaeva^{a,#}, V. S. Boyko^b, and V. N. Yakimenko^a

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry
Siberian Division, RAS, prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

^b*Omsk Agrarian Scientific Center
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

[#]*E-mail: konarbaeva@issa-siberia.ru*

In long-term stationary field experiments in the forest-steppe of Western Siberia, changes in the soil fund of iodine in the conditions of agrocenoses are shown. The content of gross and water-soluble iodine in soils was determined, the relationship of these indicators with the soil humus content and granulometric composition was revealed. In the virgin state, the heavier and humusized meadow-chnozem soil contained 3–4 times more gross iodine than the virgin gray forest soil; at the same time, the level of water-soluble iodine in both soils was practically the same and was at the optimal level – 0.05–0.06 mg/kg. With prolonged intensive cultivation of potatoes, vegetables and cereals, the soil content of iodine available to plants has significantly decreased, moving into the class of low security.

Key words: soil, agrocenosis, fertilizers, yield, gross and water-soluble iodine.