

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.47

ИОД И СЕЛЕН В ПОЧВАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ
(НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ ТИТОВКИ)В.Ю. Березкин¹, Е.М. Коробова², В.Н. Данилова³^{1–3} Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН
(ГЕОХИ РАН), лаборатория биогеохимии окружающей среды¹ Канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: victor76@list.ru² Зав. лабораторией, д-р геол.-минерал. наук; e-mail: helene_k@mail.ru³ Науч. сотр.; e-mail: val1910@mail.com

Изучены особенности распределения I и Se в почвах сопряженных ландшафтно-геохимических систем бассейна р. Титовки (Брянской области, РФ), на разных типах почвообразующих пород (лессовидные суглинки и флювиогляциальные пески и супеси). Выявлено, что в контрастных условиях содержание обоих элементов варьирует в различных генетических горизонтах исследованных почв в широких пределах (I: 0,22–7,93 мг/кг, $n = 93$; Se: 0,001–0,67 мг/кг, $n = 93$, на воздушно сухую массу (в. с. м.)). Серая лесная суглинистая почва (Greyzemic Phaozems) на лессовидных суглинках содержит в верхнем 20 см слое в 2 раза больше I и почти в 4 раза больше Se, чем дерново-подзолистая супесчаная (Stagnic Retisols Arenic) на двучленных отложениях в том же слое (1,67 против 0,81 мг/кг в. с. м. по иоду ($p < 0,05$) и 0,45 против 0,12 мг/кг в. с. м. по селену ($p < 0,05$)).

Это связано как с типом материнской породы и более высоким содержанием органического вещества, так и с более тонким гранулометрическим составом серых лесных почв. Содержание I и Se в донных отложениях р. Титовки (0,59 и 0,36 мг/кг в. с. м.) наиболее сопоставимы с верхним горизонтом дерново-карбонатно-глеевой почвы (Gleyic Calcic Fluvisols), опробованной в нескольких метрах от места взятия донных отложений (I: 0,57 мг/кг в. с. м.; Se: 0,35 мг/кг в. с. м.). При этом характер дифференциации элементов в почвенных горизонтах существенно различался, что обусловлено их сродством к разным геохимическим барьерам. Иод активно фиксируется на биогеохимическом и щелочно-карбонатном барьере и подвижен в восстановительных условиях. Селен, напротив, концентрируется на глеевом барьере и подвижен в окислительной обстановке. Это необходимо учитывать при оценке обеспеченности почв и местных продуктов питания указанными биологически значимыми химическими элементами, особенно в зонах, подверженных воздействию радиоактивных изотопов иода.

Ключевые слова: иод, селен, вертикальная и латеральная дифференциация элементов, сопряженные элементарные ландшафты, геохимические барьеры, Greyzemic Phaozems, Calcic Albic Luvisols, Gleyic Calcic Fluvisols, Stagnic Retisols Arenic

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.1

ВВЕДЕНИЕ

Иод и селен принадлежат к группе биологически значимых элементов, играющих важную роль в функционировании гормональной системы животных и человека. Дефицит I приводит к заболеваниям щитовидной железы (ЩЖ) и является серьезной проблемой во многих странах мира, в том числе в России, что значительно снижает уровень здоровья населения [Виноградов, 1927; Зырин, Зборишук, 1975; Ковальский, 1974; Кашин, 1987; Коробова и др., 2014; Лебедев, 1973; Лозовский, 1971; Пристер и др., 1977; Потатуева и др., 1976; Прошин, Дорощенко, 2005; Тихомиров, 1983; Ahmad et al., 2021;

Ligowe et al., 2021; Zhong et al., 2021; Shakhtarin et al., 2003]. Селен участвует в синтезе глутатионпероксидаз, которые, в свою очередь, принимают участие в метаболизме тиреоидных гормонов. Поэтому дефицит Se на фоне дефицита I усугубляет дисфункцию ЩЖ [Магомедова и др., 2015; Орозбаева и др., 2017; Синдирева и др., 2019]. Испытания ядерного оружия и развитие атомной энергетики привели к возникновению новой проблемы – загрязнению окружающей среды техногенными радионуклидами, в том числе радиоактивными изотопами I, которые вовлекаются в природные биогеохимические циклы и поступают в пищевые цепи человека. Накоп-

ление радионуклидов I в щитовидной железе даже в ничтожной концентрации приводит к локальному облучению и создает дополнительную негативную нагрузку на ЩЖ [Звонова и др., 2004; Тихомиров, Каспаров, 1979; Korobova, 2010].

Изотопы I обеспечили максимальную дозовую нагрузку на население районов, пострадавших от выпадений радионуклидов в течение первых месяцев после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) [Питкевич, Шершаков, 1993]. При этом наиболее значимым источником внутреннего облучения явился изотоп ^{131}I (период полураспада – 8,02 сут), который поступал в организм не только с водой, молоком и листовыми овощами, но и с вдыхаемым воздухом, создавая так называемый «иодный удар» [Зырин, Зборищук, 1975; Коробова, Кувылин, 2004; Прохоров и др., 1978].

Поскольку Брянская область при аварии на ЧАЭС была подвержена наибольшему выпадению радиоактивных изотопов иода, исследование обеспеченности почв, различных по геохимическим

условиям миграции иода и селена, представляется актуальной задачей. Разнообразие почвенно-геохимических условий Брянской области определяется существенным варьированием рельефа и состава почвообразующих пород на ее территории [Воробьев, 1993].

Цель исследований – оценка природной обеспеченности I и Se почв геохимически контрастных ландшафтов и сопоставление характера вертикального распределения указанных элементов в почвах в автоморфных и гидроморфных условиях их формирования.

Характеристика элементарных ландшафтов долины р. Титовки. Правобережье р. Титовки представлено серией тестовых участков, характеризующих водораздельный участок под яблоневым садом (разрез Т-1), крутой склон к реке юго-западной экспозиции (разрезы Т-2–Т-4), правобережную пойму (разрез Т-5) (рис. 1, табл. 1 – названия почв даны по [World Reference Base..., 2014]) и донные отложения р. Титовка (Т-6).

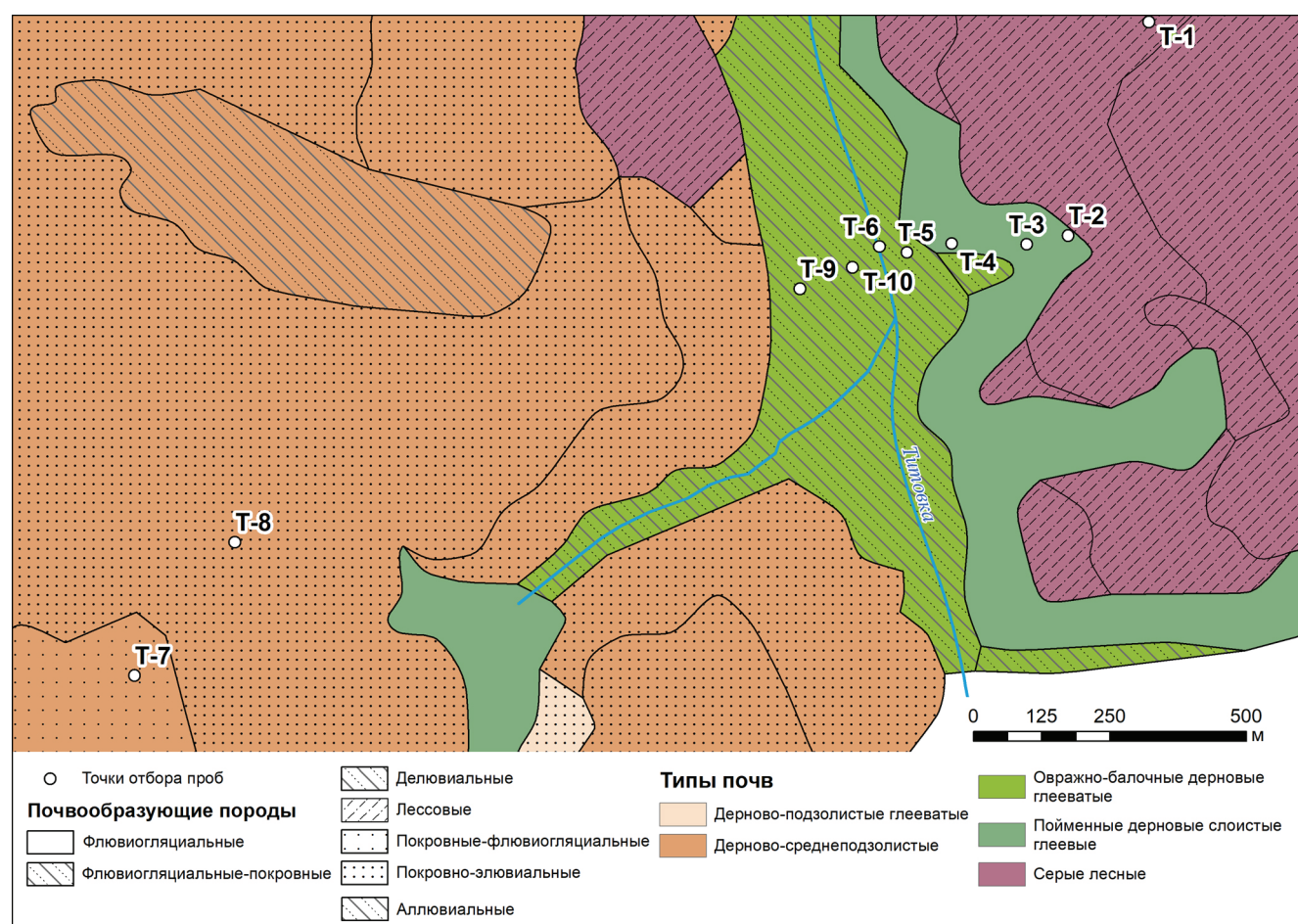


Рис. 1. Почвенная карта долины р. Титовки с точками пробоотбора. Карта векторизована В.С. Баранчуковым с почвенной карты Брянского района Брянской области: лист 21а. клх. им. Карла Маркса. М 1:10 000

Fig. 1. Soil map of the Titovka River valley and sampling points (vectorized by V.S. Baranchukov from the soil map of the Bryansk district of the Bryansk region: sheet 21a. Karl Marx klkh. Scale 1:10 000)

Таблица 1

**Характеристика элементарных ландшафтов долины р. Титовки, почвы которых были
исследованы на содержание I и Se в период с 2010 по 2020 г.**

Номер разреза	Тип почв*	Почво- образующие породы	Местоположение	Травяной ярус	ПП, %	Уровень грунтовых вод, м
T-1	Окультуренная темно-серая лесная (Greyzemic Phaozems)	Лессовидные карбонатные суглинки	Междуречье по правому берегу р. Титовка, заброшен- ный яблонево-березовый сад с рябиной, березой, дубом (в подросте)	<i>Dactylis glomerata</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Agrimonia eupatoria</i> , <i>Poa pratensis</i>	80	>5
T-2	Темно- серая лесная (Greyzemic Phaozems)	Лессовидные карбонатные суглинки	В нескольких метрах от бровки склона, на окраине вторичного березняка, гранича- щего с пашней	<i>Dactylis glomerata</i> , <i>Trifolium pratense</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Lupinus</i>	70	>5
T-3	Светло-серая лесная слабо смытая (Calcic Albic Luvisols)	Лессовидные карбонатные суглинки	Средняя часть склона под вторичным березняком с под- ростом из дуба и сосны, незатронутом распашкой	<i>Poa pratensis</i> , <i>Galium mollugo</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Fragaria vesca</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Dactylis glomerata</i>	40–50	>2
T-4	Светло-серая лесная слабо смытая (Calcic Albic Luvisols)	Лессовидные карбонатные суглинки	Сочленения склона коренного берега с фрагментом слабо- выраженной над- пойменной террасы. Вторичный березняк	<i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Alchemilla vulgaris</i> , <i>Poa pratensis</i> <i>Argostis capillaris</i>	80	>2
T-5	Аллювиальная луговая (дерно- во-глеевая) кар- бонатная (gleyic calcic fluvisols)	Аллювиальные слоистые отло- жения низкой поймы	Низкая пойма р. Титовки, под зла- ково-разнотравным лугом	<i>Festuca ovina</i> , <i>Knautia arvensis</i> , <i>Agrimonia eupatoria</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Cichorium intybus</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Trifolium pratense</i>	80	1,2
T-8	Дерново- подзолистая, на флювиогляци- альных песках (stagnic retisols arenic)	Водноледнико- вые пески, подстилае- мые элювием коренных оса- дочных пород (силицит)	Междуречье по лево- бережью р. Титовки. Сосняк (сомкнутость крон 0,7) с подростом сосны, березы, оси- ны, ивы и рябины	<i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Alchemilla vulgaris</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Argostis capillaris</i>	20	>5
T-9	Аллювиальная темногумусово- глеевая (eutric gleyic fluvisols)	Аллювиальные слоистые отло- жения низкой поймы	Высокая левобереж- ная пойма р. Титовки в 60 м от бровки низкой поймы. Потравленный луг, используемый для выпаса скота	<i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Trifolium pratense</i> , <i>Scorzoneroideis autumnalis</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Potentilla anserina</i>	80	0,85
T-10	Иловато-пере- гойная почва с погребенными торфянистыми горизонтами (histic fluvisols)	Аллювиальные слоистые отло- жения низкой поймы	Хвощово-осоковое болото на низкой левобережной пойме в 15 м от уреза воды	<i>Equisetum arvense</i> , <i>Carex cespitosa</i> , <i>Carex alba</i> , <i>Carex acuta</i>	~100	С поверх- ности

Примечание. *Названия почв дублированы по [World Reference Base..., 2014].

Разрез Т-1 расположен в центральной части автономной ЭЛГС (правобережный водораздельный участок). Схема строения почвенного профиля: ОА_д – А₁ – А_{1е} – А_{1еВ} – В₁ – В₂ – ВС – ВС_к – ВС_кg. Сильное вскипание от 10% HCl наблюдалось с глубины 107 см (горизонт ВС_к) и свидетельствует о карбонатности почвообразующих пород и о наличии в нижней части профиля карбонатно-щелочно-го барьера.

Разрез Т-2 расположен в 100 м от Т-1 в пределах того же ландшафта. Схема строения почвенного профиля: А₀А₁(дерн) – А₁(пах) – А₁А₂ – В₁ – В₂ – В₃ – С_к. Вскипание от 10% HCl с глубины 155 см (с верхней границы С_к).

Разрез Т-3 заложен в 34 м от разреза Т-2 в средней части склона, местами до 30° (транзитный ландшафт). Схема строения почвенного профиля: А₀А₁ – А₁ – А₁А₂ – А₂В – В₁ – В₂ – ВС – С. Вскипание зафиксировано с глубины 100 см (верхняя граница ВС_к).

Разрез Т-4, вскрытый в 35 м от предыдущего, характеризовал зону сочленения склона коренного берега с фрагментом слабовыраженной надпойменной террасы (см. табл. 1). Схема строения почвенного профиля: А₀А₁ – А₁А₂ – А₂В₁ – В₁fe – В₂fe – В₃fe – ВСfe – ВСfe,g' – Сfe,g'.

Почва правобережной низкой поймы (субаквальный ландшафт) р. Титовки характеризуется разрезом Т-5. Схема строения почвенного профиля: А₀А₁ – А₁k – А₁Bk – В₁g'k – В₂g'k – Сgk. Вскипание почвы от 10% HCl наблюдалось с глубины 45 см (В₁g'k).

Аквальный ландшафт характеризуется донными отложениями реки (Т-6 (кern)), отобранными буром с правого берега, на расстоянии примерно 1 м от береговой линии. Донные отложения представляют собой темно-серый, почти черный, торфянистый ил, с растительными остатками и включениями слабоокатанной гальки. Глубина реки в районе отбора пробы не превышала одного метра. В районе отбора пробы на берегу отмечены многочисленные следы крупного рогатого скота.

Левобережье реки представлено разрезом Т-8 (расположен в центральной части автономного ландшафта). Схема строения почвенного профиля: А₀ – А₀А₁ – А₁А₂ – В₁ – В₂fe – В₃ – В₄fe – В₅ – Сg'. Почва не вскипает от 10% раствора HCl (см.: табл. 1, рис. 1).

Субаквальный ландшафт по левому берегу р. Титовки представлен разрезом Т-9. Разрез расположен на высокой пойме, в 60 м от бровки низкой поймы (см. табл. 1, рис. 1). Схема строения почвенного профиля: А₀А₁ – А₁ – А₁g – А₁В₁g – В₁g – В₂g – В₃g – Сg. Почва не вскипает от 10% раствора HCl.

На низкой левобережной пойме в 15 м от уреза воды взят kern Т-10 (см. табл. 1, рис. 1). Схема стро-

ения почвенного профиля: АТ' – АТ'' – АТ''' – Т₁ – G – [Т₂]. Почва не вскипает от 10% раствора HCl.

Как следует из приведенных описаний, строение и состав обследованных почв автономных и подчиненных ландшафтов существенно различаются вследствие формирования на разнотипных породах, что определяет и особенности формирования их вертикального профиля.

На лессовидных суглинках сформировались серые лесные суглинистые почвы, в которых первичная карбонатность почвообразующих пород фиксируется с 1 м и глубже, а в пойменных почвах подчиненных ландшафтов – с глубины 45 см, в то время как в междуречье в области распространения двучленных отложений (см. табл. 1: флювиогляциальные пески подстилаемые элювием коренных осадочных пород) вскрыты дерново-подзолистые почвы, причем и сопряженные с ними пойменные почвы бескарбонатные.

В число обследованных почв подчиненных ландшафтов вошли также карбонатные и бескарбонатные варианты разной степени обводненности и гумусности, что хорошо диагностируется морфологически. В целом полученный набор образцов позволяет охарактеризовать поведение иода и селена в геохимически контрастных ландшафтах, весьма типичных для Брянской области [Волкова, Жучкова, 2000].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Почвы сопряженных ландшафтов исследованы в бассейне р. Титовки (Брянского района Брянской области), которая протекает по границе распространения пород разных типов: лессовидных карбонатных суглинков (расположены по ее правому берегу) и двучленных бескарбонатных отложений (элювия силикатных пород, перекрытого плащом флювиогляциальных песков и супесей – по левому берегу) (см. рис. 1). Это обстоятельство приводит к существенному различию почвенно-растительного покрова как водораздельных, так и пойменных ландшафтов в пределах заложенного ландшафтного профиля. Водораздел правобережья занят серыми лесными почвами, используемыми под садовую культуру и пашни. По левому берегу на водоразделе распространены дерново-подзолистые почвы, покрытые лесами и пашнями. Склоны и террасы разной крутизны активно используются по обе стороны реки для выпаса скота.

Закладывая поперечный профиль в долине р. Титовки, авторы предполагали, что в связи с разным типом пород и растительности по ее берегам будет наблюдаться существенное различие в содержании I и Se в почвах элементарной ландшафтно-геохимической системы (ЭЛГС) [Глазовская, 1988; Побы-

нов, 1956] как в латеральном, так и в вертикальном простирании.

Для изучения и сопоставления вертикальной миграции иода и селена в почвах автономных и подчиненных ландшафтов по разным берегам р. Титовки было заложено восемь почвенных разрезов и взяты образцы донных отложений (см. рис. 1).

Отбор образцов почв проводился по стенке разреза с учетом генетических горизонтов согласно морфологическому описанию профиля, а также, в ряде случаев, почвенным буром из нижних горизонтов.

Донные отложения отобраны тростевым буром в виде ненарушенного керна, что позволило точно разделить отложения на слои мощностью 10 см. Всего на содержание иода проанализировано 84 индивидуальных образца почв, селена – 82 образца.

Определение I выполнялось в лабораторных условиях ускоренным кинетическим роданидно-нитритным методом [Проскурякова, Никитина, 1976] на фотометре КФК-3-01 из свежих образцов. Все результаты для сопоставимости пересчитывались затем на воздушно-сухую навеску. Чувствительность метода – 1–4 нг/мл, воспроизводимость – 2–7%. Общая и гигроскопическая влага определялась стандартными методами [Аринушкина, 1970].

Определение Se проводилось спектрофлуориметрическим методом в воздушно-сухих образцах [Ермаков и др., 2010]. Чувствительность метода – 1 нг/мл, воспроизводимость – 7%.

Все остальные данные по исследуемым почвенным образцам получены в лабораторных условиях стандартными методами: для определения pH водной вытяжки из почв – ГОСТ 26423-85, для органического вещества – ГОСТ 23740-2016.

Статистическая обработка полученных данных осуществлялась в программе MS Excel. Взаимосвязь между содержанием иода, селена, органического вещества и pH водной вытяжки рассчитывалась с помощью коэффициента корреляции Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая оценка обеспеченности почв иодом и селеном. Содержание иода варьировало в образцах, отобранных по генетическим горизонтам с учетом особенностей их строения в пределах порядка величин от 0,22 до 7,93 мг/кг воздушно-сухой массы (в. с. м.). Наибольшие концентрации иода, найденные в изученных образцах, отвечают уровню эколого-геохимического оптимума иода в почвах по В.В. Ковальскому [Калмет, 1975]. Однако такие уровни были обнаружены только в верхних горизонтах (0–30 см) пойменной перегнойно-торфяной почвы.

Среднее содержание иода во всех проанализированных пробах из разных почвенных горизон-

тов оказалось существенно ниже ($1,37 \pm 0,17$ мг/кг в. с. м., $n = 88$) и соответствовало условиям, фиксированным в районах распространения эндемического зоба [Ковальский, 1974] (табл. 2). Содержание селена варьировало в образцах в еще большей степени, чем иода (от 0,001 до 0,668 мг/кг), но среднее содержание составило $0,221 \pm 0,027$ мг/кг в. с. м. ($n = 86$), что несколько ниже среднемировой величины (0,4 мг/кг в. с. м.) и отвечает диапазону селенодефицита по международным оценкам [Plant, Kinniburgh, 2005] (см. табл. 2).

Частотные гистограммы распределения концентраций иода и селена во всем массиве образцов представлены на рис. 2. Они показывают, что распределение концентраций элементов в пробах не отвечает нормальному закону распределения. Гистограмма по иоду отражает существенно большую концентрацию иода в образцах перегнойно-торфяной почвы и доминирование содержаний в интервале 0,22–1,08 мг/кг в. с. м. (52%), при этом в 80% образцов содержание иода не превышает 1,93 мг/кг, что подтверждает их общую дефицитность по иоду. Распределение содержания селена в почвах более равномерное, доминирующее содержание (27% образцов) – 0,075–0,149 мг/кг, но при этом в 12% проб его количество (0,446–0,594 мг/кг) несколько превышает среднемировой уровень (кларк почв – 0,4 мг/кг, по Виноградову, цитируется по: [Побилат, Волошин, 2020]).

Таким образом, дефицит селена может иметь существенное значение как дополнительный фактор риска заболеваний ЩЖ только в пределах ареалов почв с его наиболее низким содержанием в почвенном профиле.

Вертикальное распределение иода и селена в почвах. Распределение иода и селена в вертикальных почвенных разрезах рассмотрено на фоне варьирования по профилю pH и содержания органического вещества (рис. 3, 4). Установлено, что как I, так и Se существенно варьируют по профилю, симбатно (однаправленно) изменению органического вещества: для обоих элементов характерно более высокое содержание в гумусовых (Т-1–Т-9) и торфяных (Т-10) горизонтах.

Влияние изменения величины pH вниз по профилю I и Se оказалось различным, что отражает разные химические свойства этих элементов и их соединений (прямым для иода и обратным для селена). Максимальное значение корреляции по pH выявлено как для иода $R_{\text{pH}} = 0,68$ ($n = 10$; $p < 0,05$), так и для селена $R_{\text{pH}} = -0,63$ ($n = 10$; $p < 0,05$) – разрез Т-3 (серые лесные). По органике максимальная корреляция наблюдалась для разреза Т-10 (аллювиально-луговая карбонатная): иод – $R_{\text{Сорг}} = 0,77$ ($n = 6$; $p < 0,05$), селен – $R_{\text{Сорг}} = 0,78$ ($n = 6$; $p < 0,05$).

Таблица 2

Статистические характеристики содержания I и Se в генетических горизонтах основных типов почв долины р. Титовки

Отдел почв	Тип почв и разрез*	Горизонт(ы)	Число образцов	Иод, мг/кг					Селен, мг/кг				
				Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	Минимум
Текстурно-дифференцированные	Greyzemic Phaeozems T1	ОА _д –А ₁	3	1,73	1,45	0,25	1,37	1,26	0,39	0,35	0,05	0,37	0,28
		А ₁ е–А ₁ еВ	3	1,93	1,84	0,15	1,93	1,67	0,63	0,50	0,13	0,51	0,37
		В ₁ –В ₂	4	2,00	1,58	0,40	1,59	1,12	0,55	0,38	0,18	0,42	0,15
		BC–BC _{kg}	4	5,43	2,85	1,86	2,47	1,01	0,26	0,16	0,07	0,14	0,10
	Stagnic Retisols Arenic T8	А ₀ –А ₀ А ₁	3	0,77	0,74	0,03	0,72	0,72	0,15	0,13	0,02	0,14	0,11
		А ₁ А ₂	3	1,30	1,03	0,24	0,96	0,83	0,13	0,12	0,01	0,12	0,12
		В ₁ –В ₂ fe	4	0,81	0,57	0,18	0,53	0,39	0,16	0,13	0,02	0,13	0,12
		В ₃ –В ₅	3	0,50	0,36	0,12	0,30	0,27	0,12	0,11	0,01	0,11	0,10
		Cg	3	1,19	0,73	0,40	0,53	0,47	0,20	0,13	0,06	0,10	0,09
	Alluvial Gleyic Calcic Fluvisols T5 Eutric Gleyic Fluvisols T9	А ₀ А ₁ –А ₁ k	2	0,58	0,49	0,13	0,49	0,40	0,35	0,33	0,03	0,33	0,31
		А ₁ Bk	2	0,48	0,45	0,04	0,45	0,42	0,48	0,34	0,19	0,34	0,20
		В ₁ g'k–В ₂ g'k	3	0,60	0,49	0,09	0,46	0,42	0,24	0,21	0,03	0,21	0,19
		Cgk	3	0,88	0,57	0,27	0,42	0,40	1,76	0,73	0,89	0,27	0,17
		А ₀ А ₁ –А ₁	2	2,42	2,26	0,22	2,26	2,11	0,57	0,49	0,12	0,49	0,40
		А ₁ g–А ₁ B ₁ g	4	2,31	2,04	0,32	2,14	1,58	0,67	0,55	0,10	0,49	0,44
		В ₁ g–В ₂ g	4	1,20	0,77	0,34	0,69	0,47	0,46	0,36	0,11	0,38	0,24
		В ₃ g–Cg	2	0,42	0,32	0,14	0,32	0,22	0,15	0,10	0,06	0,10	0,06

Примечание. *По данным [World Reference Base..., 2014].

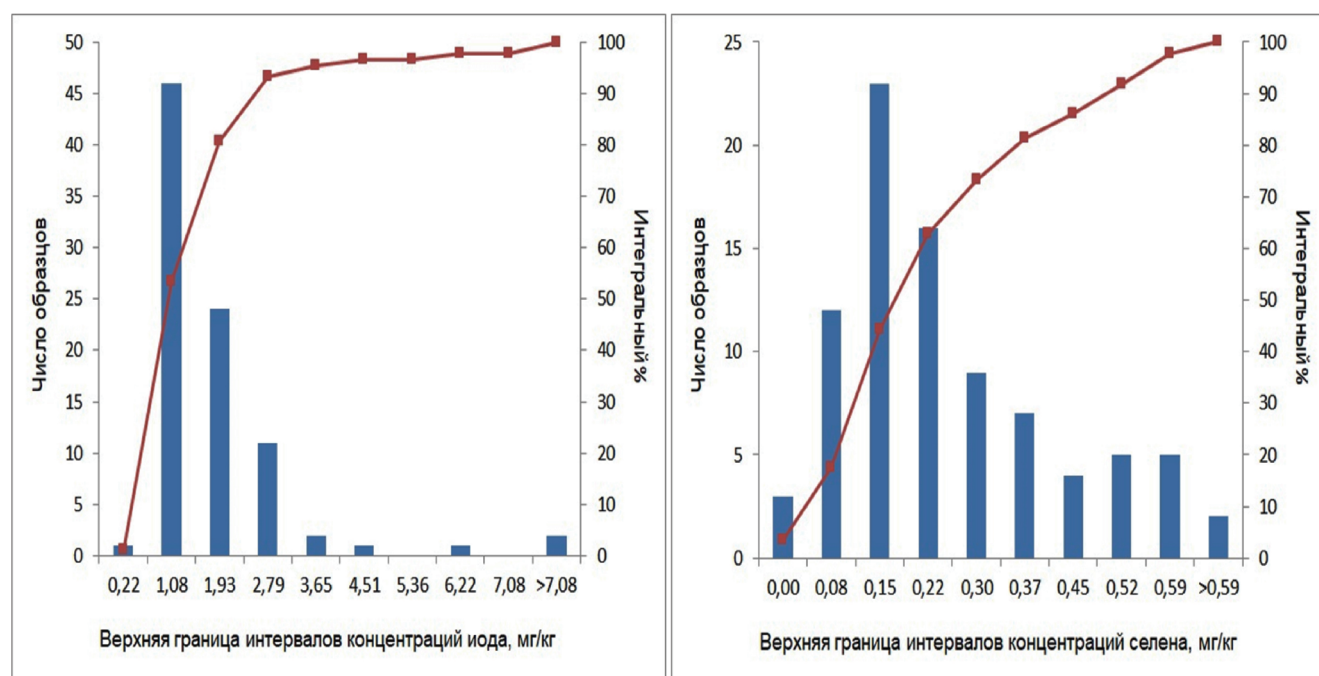


Рис. 2. Верхние границы интервалов концентраций иода и селена

Fig. 2. Upper limits of the intervals of iodine and selenium concentrations

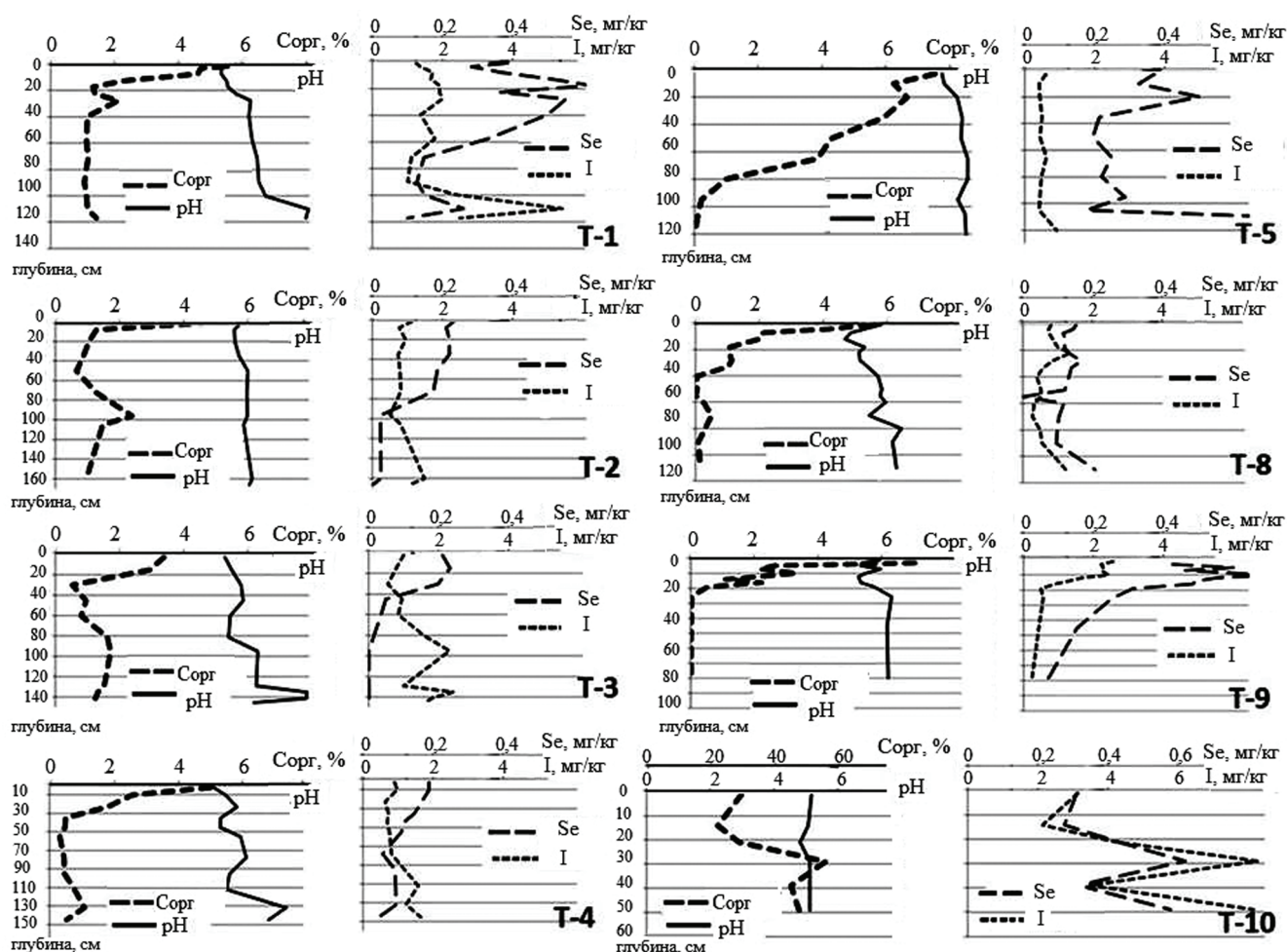


Рис. 3. Вертикальное распределение иода и селена на правобережье:

T-1 – вершина водораздела; T-2 – бровка склона водораздела; T-3 – средняя часть склона; T-4 – нижняя часть склона;

T-5 – низкая пойма; на левобережье: T-8 – вершина водораздела; T-9 – высокая пойма; T-10 – низкая пойма

Fig. 3. Vertical distribution of iodine and selenium in soils:

T-1 – top of the watershed; T-2 – edge of the watershed slope; T-3 – middle part of the slope; T-4 – lower part of the slope; T-5 – low floodplain; of the left bank: T-8 – top of the watershed; T-9 – high floodplain; T-10 – low floodplain

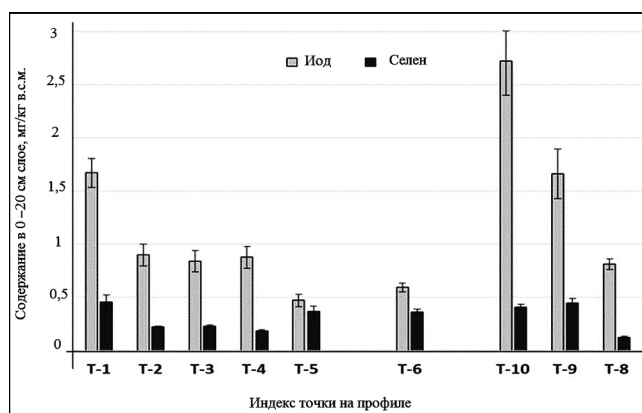


Рис. 4. Распределение иода и селена (мг/кг) в почвах сопряженных ландшафтов.

Данные по почвам усреднены для слоя 0–20 см: T-1 и T-8 ($n = 5$); T-2–T-5 и T-10 ($n = 3$); T-9 ($n = 7$). Для донных отложений р. Титовки (T-6) данные усреднены по керну (0–20 см). Вертикальные планки погрешности показывают ошибку среднего

Fig. 4. Distribution of iodine and selenium (mg/kg) in soils of the coupled landscapes.

Soil data are averaged for the 0–20 cm layer: T-1 and T-8 ($n = 5$); T-2–T-5 and T-10 ($n = 3$); T-9 ($n = 7$). Data for the bottom sediments of the Titovka River (T-6) are averaged over the core (0–20 cm). The vertical error bars show the error of mean

Иод принадлежит к активным воздушным и водным мигрантам [Перельман, 1975], в природных водах присутствует преимущественно в формах иодида и иодата, а его распределение и фиксация в почвах зависит от содержания в почвенных горизонтах органического вещества, дисперсности твердой фазы и смены кислотно-щелочных условий на границах генетических горизонтов [Коробова и др., 2019; Коробова и др., 2014; Лозовский, 1971; Перельман, 1975; Korobova, 2010; Korobova et al., 2014; Pérez-Sirvent et al., 2010; Fuge, Johnson, 1986]. В восстановительной обстановке он присутствует в форме иодида, в кислородной щелочной – часто также в форме иодата.

Селен является редким, но не рассеянным элементом, поскольку образует более 83 минералов. В своем поведении и миграции часто сопутствует сере. При смене кислой среды на щелочную и сера, и селен энергично мигрируют, восстановительная обстановка способствует переходу селена в твердую фазу, при этом селен восстанавливается более легко, чем сера [Сидельникова, 1999]. Гидроксиды железа (Fe^{3+}) осаждают селенит-ионы при pH 7–8,5 по механизму химической сорбции [Коробова и др., 2014]. Такое различие в поведении должно было привести и к различию в активности миграции и вертикальному распределению иода и селена в контрастных по составу и pH-Eh условиям почвенных горизонтов.

Это различие проявилось особенно ярко в вертикальных разрезах серых лесных почв, в которых, в отличие от селена, иод концентрируется как в верхних горизонтах (биогеохимический барьер), так и в нижней части профиля (щелочно-карбонатный барьер) (разрезы Т-1–Т-3) (рис. 2).

Интересно и характерно сближение концентраций иода и селена в аллювиально-луговой (дерново-глеевой) карбонатной почве (разрез Т-5), в условиях которой селен малоподвижен, а иод подвижен и может вымываться в виде комплекса CaI^+ при господстве периодически промывного режима и отсутствии выраженного органогенного горизонта. Концентрации обоих элементов возрастают в профиле Т-5 только в его нижней части в оглеенной карбонатной почвообразующей породе ($\text{Se} > \text{I}$) (см. рис. 2, разрез Т-5). Для обоих элементов характерно некоторое накопление в верхних органогенных горизонтах во всех обследованных разрезах. При этом I типично и существенно в большей степени, чем Se, накапливается в перегнойных и перегнойно-торфяных горизонтах, в том числе в погребенных горизонтах (Т-9–Т-10) супераквальных ландшафтов (на биогеохимическом барьере). Относительно высокое, по сравнению с другими горизонтами, содержание иода в дерново-подзоли-

стой почве, на глубине 20 см (разрез Т-8), по нашему предположению, маркирует границу старопашотного горизонта (аналогично относительному накоплению иода в профилях серой лесной почвы на глубине порядка 20 см (разрезы Т-1, Т-2) (сорбционный барьер).

Как показали ранее выполненные исследования [Balzer et al., 2020; Mohiuddin et al., 2021]: «...органическое вещество и оксиды железа являются наиболее важными компонентами для связывания иода в твердой фазе в почвах». Наблюдавшееся нами обилие Fe-конкреций в нижнем горизонте дерново-подзолистой почвы, вскрытой разрезом Т-8, позволяет предположить, что концентрирование иода в ней глубже 100 см связано, по нашему мнению, с появлением обогащенности горизонта гидроксидами Fe^{3+} , что способствует фиксации элемента также на сорбционно-кислородном барьере.

При анализе характера латерального распределения средневзвешенного содержания иода, рассчитанного по всей трансекте с учетом концентрации элемента в каждом опробованном слое и его мощности, подтвердилась существенная контрастность почвенного покрова ландшафтно-геохимических систем как по концентрации иода, так и селена в верхнем корнеобитаемом слое (см. рис. 4).

В латеральном сопряжении наблюдается резкое накопление иода и селена в заболоченных пойменных почвах, существенно обогащенных органическим веществом не только растительного, но и животного происхождения (экскременты крупного рогатого скота за счет регулярного его выпаса).

В автономных ландшафтах, несмотря на явную выщелоченность за счет длительного хозяйственного использования, серая лесная суглинистая почва на лессовидных суглинках содержит в верхнем 20-сантиметровом слое в 2 раза больше иода и почти в 4 раза больше селена, чем дерново-подзолистая супесчаная в том же слое (1,67 против 0,81 мг/кг по иоду (в. с. м.) и 0,453 мг/кг против 0,120 мг/кг по селену (в. с. м.); см. рис. 4). По-видимому, это может быть связано с более высоким содержанием органического вещества (до 5,9% в верхнем горизонте серой лесной почвы).

Таким образом, более высокое содержание иода и селена в исследованных почвах супераквальных ландшафтов (в сравнении с автономными) позволяет предполагать, что они наиболее благоприятны для выпаса скота в целях повышения микроэлементной обеспеченности животных и получения животноводческой продукции более высокого качества. С другой стороны, при загрязнении территории радиоактивным иодом можно ожидать более высокое поступление этого радионуклида в молоко коров при выпасе их на пойме.

ВЫВОДЫ

В пределах малого, но геохимически неоднородного речного бассейна (р. Титовка, Брянская область) обнаружена высокая контрастность распределения I и Se в почвенном покрове автономных и подчиненных ландшафтов благодаря существенному различию состава почвообразующих пород. Показано, что существенные вертикальная и латеральная дифференциации изученных элементов в сопряженных элементарных ландшафтах определяются высокой степенью сродства иода к органическому веществу и различием поведения иода и селена в однотипных окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условиях.

Показано, что различные комбинации факторов миграции приводят либо к росту, либо к снижению вариабельности соотношений концентраций иода и селена как по вертикальному разрезу почв, так и в латеральном направлении. В серой лесной старопашотной почве иод частично вынесен из верхнего (A_1) горизонта, слабо фиксируется на сорбционном барьере в горизонтах A_1A_2 и B_3 , максимально накапливаясь на щелочно-карбонатном барьере в нижней части профиля (B_k или BC_k).

В пойменных почвах кальциевого класса в условиях частого обводнения и господства восстановительных условий происходит существенное обеднение иодом всего почвенного профиля, что может быть связано с регулярным многолетним выносом иода с водой, например в форме комплексного иона

CaI^+ (принципиальная возможность показана нами ранее [Коробова и др., 2014]). Та же обстановка, напротив, способствует накоплению селена, который образует слабо подвижные формы в восстановительных условиях.

На фоне низкого содержания иода в исследуемых почвах наблюдается его локальное относительное накопление на биогеохимическом и щелочном барьерах. Новые данные по содержанию $C_{орг}$ и pH, полученные в 2020 г., подтвердили влияние обоих факторов (органического вещества и карбонатов) на накопление иода в разных почвах.

Обнаружено, что в подчиненных гидроморфных транзитных ландшафтах кальциевого класса возможно относительное обеднение почв иодом при относительном обогащении селеном. Это может стимулировать механизм компенсации недостатка поступления иода в ЩЖ животных с естественными кормами за счет повышения поступления селена при их выпасе на пастбищах, расположенных в поймах рек, дренирующих карбонатные отложения.

Факт локальной относительной обогащенности супераквалных ландшафтов не только иодом [Коробова и др., 2019], но и селеном, свидетельствует о том, что выпас скота в незагрязненных поймах рек лесной зоны может способствовать естественному повышению содержания этих элементов в почвах пойм, с соответствующим большим их переходом в молоко в этот период, что повышает его качество как продукта питания.

Благодарности. В определении иода в почвах принимали участие: магистр геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова М.А. Горохова, сотрудники института ГЕОХИ РАН – науч. сотр. Л.В. Кригман и ст. науч. сотр., канд. хим. наук Н.В. Корсакова. Векторизованная карта района исследования создана сотрудником ГЕОХИ РАН мл. науч. сотр. В.С. Баранчуковым. Район исследования был выбран по рекомендации директора ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» П.В. Прудникова. Выражаем всем свою искреннюю благодарность за вклад в результаты представленных исследований. Полевые работы выполнены за счет гранта РФФИ № 10-05-01148, лабораторные работы (частично) – за счет гранта № 20-55-00012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.
- Виноградов А.П. Иод в природе // Природа, 1927, С. 670–678.
- Волкова Н.И., Жучкова В.К. Полесско-опольские ландшафтные экотоны // Вестник Воронежского ун-та. Сер. География и геоэкология, 2000. № 1. С. 26–30.
- Воробьев Г.Т. Почвы Брянской области. Брянск: Грани, 1993. 160 с.
- Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 327 с.
- Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Хушвахтова С.Д., Данилова В.Н., Боев В.А., Барабанищикова Л.Н., Чудинова Е.А. Особенности количественного определения селена в биоматериалах // Вестник ТГУ. 2010. № 3. С. 206–214.
- Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А., Данилова И.О., Власов О.К., Щукина Н.В. Дозы облучения щитовидной железы у населения России вследствие выпадений радиоактивного иода после аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 2004. № 4(96). С. 310–316.
- Зырин Н.Г., Зборищук Ю.Н. Содержание иода в пахотном слое почв европейской части СССР // Почвоведение. 1975. № 9. С. 49–54.
- Калмет Р. Содержание иода в почвах Эстонской ССР // Научные труды Эст. НИИ земледелия и мелиорации. Таллин. Т. 36. 1975. С. 183–184.
- Кашин В.К. Биогеохимия, физиология и агрохимия иода. Л.: Наука, 1987. 261 с.
- Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 299 с.

- Коробова Е.М., Берёзкин В.Ю., Данилова В.Н., Головин М.Л., Горохова М.И. Иод и селен в почвах сопряженных элементарных ландшафтов долины р. Титовка (Брянская область) // VI Международная научно-практическая конференция «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы». Севастополь; Ханой; Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. С. 109–113.
- Коробова Е.М., Кувылин А.И. Природные биогеохимические провинции с низким содержанием иода как районы дополнительного экологического риска в зонах воздействия аварии на Чернобыльской АЭС: материалы V биогеохимических чтений «Биогеохимическая индикация аномалий». М.: Наука, 2004. С. 156–167.
- Коробова Е.М., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В., Седых Э.М., Корсакова Н.В., Данилова В.Н., Хушвахтова С.Д., Берёзкин В.Ю. К вопросу о формах нахождения иода и селена в природных водах и их концентрирование на ландшафтно-геохимических барьерах // Геохимия. 2014. № 6. С. 554–568.
- Лебедев В.Н. Содержание селена в почвах БССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Жодино: Бел. НИИ земледелия, 1973. 20 с.
- Лозовский Л.Н. Иод в почвах Белоруссии: дис. ... канд. биол. наук. М., 1971. 223 с.
- Магомедова З.Г., Гиреев Г.И., Салихов Ш.К., Луганова С.Г. Эндемический зоб как результат дисбаланса биофильных элементов в окружающей среде // Труды института геологии дагестанского научного центра РАН (Махачкала). 2015. № 65. С. 114–117.
- Орозбаева Ж.М., Бегалиев Ш.С., Топчубаева Г. Биогенные элементы селен, иод и их роль в организме // Актуальные проблемы современности. 2017. № 2(16). С. 212–216.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
- Питкевич В.А., Шершаков В.М., Дуба В.В., Гарбузова Т.Т. Загрязнение территории России радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu + ^{240}Pu , ^{131}I . Прил. 1. Часть 2 // Радиация и риск. 1993. Вып. 3. С. 71–92.
- Полынов Б.Б. Избр. труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
- Пристер Б.С., Григорьева Т.А., Перевезенцев В.М., Тихомиров Ф.А. и др. Поведение иода в почве // Почвоведение. 1977. № 6. С. 32–41.
- Побилат А.Е., Волошин Е.И. Особенности содержания селена в системе «почва – растение» // Вестник КРАСГАУ. 2020. № 11(164). С. 98–105.
- Потатуева Ю.А., Прокофьева Р.И., Бурак Ю.К., Алексеев Е.Д. Некоторые особенности поступления в растения иода на торфяных почвах // Агрохимия. № 10. 1976. С. 114–119.
- Прошин А.Д., Дорощенко В.Н. Дефицит иода среди населения Брянской области. Брянск: Ладомир. 2005. 164 с.
- Прохоров В.М., Щукин А.Б., Кветная О.М., Малкович Р.Ш. Исследование миграции радиоиода в почве // Почвоведение. 1978. № 1. С. 33–40.
- Проскурякова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств иода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. № 7. С. 140–143.
- Сидельникова В.Д. Геохимия селена в биосфере // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. Труды Биогеохимической лаборатории. Т. 23. М.: Наука, 1999. С. 81–99.
- Синдирева А.В., Степанова О.В., Кекина Е.Г. Экологическая оценка действия селена и иода в системе «почва – растение» в условиях Западной Сибири // Труды XI Международной биогеохимической школы «Биогеохимия – научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека». Тула: Изд-во Тульский гос. пед. ун-т им. Л.Н. Толстого, 2019. С. 233–237.
- Тихомиров Ф.А. Радиоэкология иода. М.: Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
- Тихомиров Ф.А., Каспаров С.В. Трансформация иодо-гумусовых соединений и их роль в доступности радиоиода растения // Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по с.-х. радиологии. М., 1979. С. 157–158.
- Ahmad S., Bailey E.H., Arshad M., Ahmed S., Watts M.J., Young S.D. Multiple geochemical factors may cause iodine and selenium deficiency in Gilgit-Baltistan, Pakistan, *Environ Geochem Health*, 2021, DOI: 10.1007/s10653-021-00936-9.
- Balzer L., Schulz K., Birkel C., Biester H. Iron oxides control sorption and mobilisation of iodine in a tropical rainforest catchment, *SOIL Discuss. Preprint*, 2020, DOI: 10.5194/soil-2020-20.
- Korobova E.M., Romanov S.L., Silenok A.V., Kurnosova I.V., Chesalova E.I., Beriozkin V.Yu. Iodine deficiency in soils and evaluation of its impact on thyroid gland diseases in areas subjected to contamination after the Chernobyl accident, *Journal Geochem. Exploration*, 2014, vol. 142, p. 82–93, DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.028.
- Korobova E.M. Soil and landscape geochemical factors which contribute to iodine spatial distribution in the main environmental components and food chain in the central Russian plain, *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, vol. 107, iss. 2, p. 180–192.
- Ligowe I.S., Bailey E.H., Young S.D., Ander E.L., Kabambe V., Chilimba A.D., Lark R.M., Nalivata P.C. Agromonic iodine biofortification of leafy vegetables grown in Vertisols, Oxisols and Alfisols, *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, p. 361–374, DOI: 10.1007/s10653-020-00714-z.
- Mohiuddin M., Yu Q., Si G., Irshad M., Farig M., Hussain Z., Duan L. Availability of iodine from acidified soil after manure amendments, *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, 1916 (2021), DOI: 10.1007/s12517-021-08268-9.
- Pérez-Sirvent C., Martínez-Sánchez M.J., García-Lorenzo M.L., Molina J., Tudela M.L., Mantilla W., Bech J. Selenium content in soils from Murcia Region (SE, Spain), *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 107, iss. 2, p. 100–109.
- Plant J.A., Kinniburgh D.G., Smedly P.L., Fordyce F.M., Klinck B.A. Arsenic and Selenium, *Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry*, 2005, vol. 9, p. 17–66.
- Fuge R., Johnson C.C. The geochemistry of iodine – a review, *Environmental geochemistry and health*, 1986, vol. 8, no. 2, p. 31–54, DOI: 10.1007/BF02311063.
- Shakhtarin V.V., Tsyb A.F., Stepanenko V.F. et al. Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident, *Int. J. Epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4, p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205.

World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, no. 106. FAO, Rome.

Zhong X., Gan Y., Deng Y. Distribution, origin and speciation of soil selenium in the black soil region of Northeast China, *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, p. 1257–1271, DOI: 10.1007/s10653-020-00691-3.

Поступила в редакцию 06.07.2021

После доработки 10.03.2022

Принята к публикации 27.06.2022

IODINE AND SELENIUM IN SOILS OF THE BRYANSK REGION (CASE STUDY OF THE TITOVKA RIVER BASIN)

V.Yu. Berezkin¹, E.M. Korobova², V.N. Danilova³

^{1–3} Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS),
Environmental Biogeochemistry Laboratory

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: victor76@list.ru

² Head of Laboratory, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: helene_k@mail.ru

³ Scientific Researcher; e-mail: val1910@mail.com

The vertical and lateral distribution of iodine and selenium in the soils on different types of parent material, i. e. loess-like loams and fluvioglacial sands and sandy loams, was studied within associated landscape-geochemical systems of the Titovka River basin (Bryansk region, Russia). It was found that the content of both elements in particular genetic horizons of the studied soils under the contrasting environment varies widely, namely I: 0,22–7,93 mg/kg, $n = 93$, and Se: 0,001–0,668 mg/kg, $n = 93$, air-dry mass. Gray forest loamy soil on loess-like loams contains 2 times more iodine and almost 4 times more selenium than sod-podzolic sandy loam soil on binary deposits (1,67 / 0,81 mg/kg for I ($p < 0,05$); 0,453 / 0,120 mg/kg for Se ($p < 0,05$), respectively).

This may be due to both the type of parent material and higher content of organic matter, and the lighter texture of gray forest soils. The content of iodine and selenium in bottom sediments of the Titovka River (0,59 and 0,36 mg/kg of air-dry mass) is most comparable with the upper horizon of sod-carbonate-gley soil sampled a few meters from the sampling site of bottom sediments (I – 0,57 mg/kg; Se – 0,35 mg/kg of air-dry mass). At the same time, the elements showed dissimilar differentiation in soil horizons, due to their affinity to geochemical barriers. Iodine is actively fixed on the alkaline-carbonate barrier and is mobile under reducing conditions, while selenium concentrates on the gleyic barrier and is mobile in an oxidizing environment. This should be taken into account when assessing the availability of these biologically significant chemical elements in soils and local food products, particularly in the areas exposed to radioactive isotopes of iodine.

Keywords: iodine, selenium, vertical and lateral differentiation of elements, coupled elementary landscapes, geochemical barriers, gray forest soils, sod-podzolic soils

Acknowledgements. M.A. Gorokhova, master student of the MSU Faculty of Geology, and L.V. Krigman, Scientific Researcher, and N.V. Korsakova, Ph.D. in Chemistry, Senior Scientific Researcher, both from the GEOKHI RAS Institute, participated in iodine analysis in soils. Vectorized map of the study area was compiled by V.A. Baranchukov, Junior Scientific Researcher of the GEOKHI RAS. The study area was chosen on the recommendation of P.V. Prudnikov, Director of the “Bryanskagrochimradiologiya” state-financed organization. The authors express sincere gratitude to all of them for their contribution to the study. Field investigations and laboratory analyses (partly) were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 10-05-01148 and 20-55-00012, respectively).

REFERENCES

- Ahmad S., Bailey E.H., Arshad M. et al. Multiple geochemical factors may cause iodine and selenium deficiency in Gilgit-Baltistan, Pakistan, *Environ Geochem Health*, 2021, DOI: 10.1007/s10653-021-00936-9.
- Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Manual on the chemical analysis of soils], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1970, 488 p. (In Russian)
- Balzer L., Schulz K., Birkel C., Biester H. *Iron oxides control sorption and mobilisation of iodine in a tropical rainforest catchment*, SOIL Discuss, Preprint, Discussion started, 9 April 2020 Author(s) 2020, CC BY 4.0 License, 2020, DOI: 10.5194/soil-2020-20.
- Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Khushvakhtova S.D., Danilova V.N. et al. Osobennosti kolichestvennogo opredeleniya selena v biomaterialakh [Special techniques of quantitative analysis of selenium in biomaterials], *Vestnik TGU*, 2010, no. 3, p. 206–214. (In Russian)

- Fuge R., Johnson C.C. The geochemistry of iodine – a review, *Environmental geochemistry and health*, 1986, vol. 8, no. 2, p. 31–54, DOI: 10.1007/BF02311063.
- Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnikh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and man-made landscapes of the USSR], Moscow, Higher School of Economics Publ., 1988, 327 p. (In Russian)
- Kalmet R. [Iodine content in the soils of the Estonian SSR], *Nauchnye trudy Est. NII zemledeliya i melioratsii* [Scientific works of the Estonian Research Institute of Agriculture and Amelioration], Tallin Publ., 1975, vol. 36, p. 183–184. (In Russian)
- Kashin V.K. *Biogeokhimiya, fitofiziologiya i agrokhimiya ioda* [Biogeochemistry, phytophysiology and agrochemistry of iodine], Leningrad, Nauka Publ., 1987, 261 p. (In Russian)
- Korobova E.M. Soil and landscape geochemical factors which contribute to iodine spatial distribution in the main environmental components and food chain in the central Russian plain, *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, vol. 107, iss. 2, November 2010, p. 180–192.
- Korobova E.M., Berezkin V.Yu., Danilova V.N. et al. [Iodine and selenium in soils of conjugated elementary landscapes of the Titovka River valley (Bryansk region)], *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ekologicheskaya geologiya: Teoriya, praktika i regional'nye problemy"* [VI International Scientific and Practical Conference "Ecological Geology: Theory, Practice and Regional Problems"], Sevastopol', Voronezh, Tsifrovaya poligrafiya Publ., 2019, p. 109–113. (In Russian)
- Korobova E.M., Kuvylin A.I. [Natural biogeochemical provinces with low iodine content as areas of additional environmental risk in the impact zones of the Chernobyl accident], *Materialy V biogeochemicheskikh chtenij "Biogeochemicheskaya indikatsiya anomalij"* [Proceedings of the V biogeochemical conference "Biogeochemical indication of anomalies"], Moscow, Nauka Publ., 2004, p. 156–167. (In Russian)
- Korobova E.M., Romanov S.L., Silenok A.V. et al. Iodine deficiency in soils and evaluation of its impact on thyroid gland diseases in areas subjected to contamination after the Chernobyl accident, *J. Geochem. Exploration*, 2014, vol. 142, p. 82–93, DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.028.
- Korobova E.M., Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. et al. K voprosu o formakh nakhozheniya ioda i selena v prirodnikh vodakh i ikh kontsentririrovanie na landshaftno-geokhimicheskikh bar'erakh [On the question of iodine and selenium occurrence forms in natural waters and their concentration on landscape-geochemical barriers], *Geokhimiya*, 2014, no. 6, p. 554–568. (In Russian)
- Koval'skii V.V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology], Moscow, Nauka Publ., 1974, 299 p. (In Russian)
- Lebedev V.N. *Soderzhanie selena v pochvakh BSSR* [The content of selenium in the soils of the BSSR], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Chemistry, Zhodino Publ., 1973, 20 p. (In Russian)
- Ligowe I.S., Bailey E.H., Young S.D. et al. Agronomic iodine biofortification of leafy vegetables grown in Vertisols, Oxisols and Alfisols, *Environ Geochem Health*, 2021, vol. 43, p. 361–374, DOI: 10.1007/s10653-020-00714-z.
- Lozovskii L.N. *Iod v pochvakh Belorussii* [Iodine in the soils of Belarus], Ph.D. Thesis in Biology, Moscow, MSU Publ., 1971, 223 p. (In Russian)
- Magomedova Z.G., Gireev G.I., Salikhov Sh.K., Luganova S.G. [Endemic goiter as a result of an imbalance of biophilic elements in the environment], *Trudy Instituta Geologii Dagestanskogo Nauchnogo Tsentra RAN* [Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Research Center of the RAS], Makhachkala, Institute of Geology of the RAS Publ., 2015, no. 65, p. 114–117. (In Russian)
- Mohiuddin M., Yu Q., Si G. et al. Availability of iodine from acidified soil after manure amendments, *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, 1916 (2021), DOI: 10.1007/s12517-021-08268-9.
- Orozbaeva Zh.M., Begaliev Sh.S., Topchubaeva G. Biogenyie elementy selen, jod i ih rol' v organizme [Biogenic elements selenium, iodine and their role in the organism], *Actual problems of our time*, 2017, vol. 2(16), p. 212–216. (In Russian)
- Perel'man A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry], Moscow, Higher School of Economics Publ., 1975, 341 p. (In Russian)
- Pérez-Sirvent C., Martínez-Sánchez M.J., García-Lorenzo M.L., Molina J. et al. Selenium content in soils from Murcia Region (SE, Spain), *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 107, iss. 2, November 2010, p. 100–109.
- Pitkevich V.A., Shershakov V.M., Duba V.V., Garbuzova T.T. et al. Zagryaznenie territorii Rossii radionuklidami ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu + ^{240}Pu , ^{131}I , prilozhenie 1, chast 2 [Contamination of the territory of Russia with radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu + ^{240}Pu , ^{131}I , annex 1, part 2], *Radiatsiya i risk*, 1993, no. 3, p. 71–92.
- Plant J.A., Kinniburgh D.G., Smedly P.L., Fordyce F.M., Klinck B.A. Arsenic and Selenium, *Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry*, 2005, vol. 9, p. 17–66.
- Pobilat A.E., Voloshin E.I. Osobennosti soderzhaniya selena v sisteme pochva rastenie (obzor) [Specific features of selenium content in the soil-plant system (review)], *Vestnik KRASGAU*, 2020, no. 11(164), p. 98–105. (In Russian)
- Polynov B.B. *Izbrannye Trudy* [Selected works], Moscow, AN SSSR Publ., 1956, 751 p. (In Russian)
- Potatueva Yu.A., Prokof'eva R.I., Burak Yu.K., Alekseev E.D. Nekotorye osobennosti postupleniya v rasteniya ioda na torfyanykh pochvakh [Specific features of iodine intake into plants on peat soils], *Agrokhimiya*, 1976, no. 10, p. 114–119. (In Russian)
- Prister B.S., Grigor'eva T.A., Perevezentsev V.M., Tikhomirov F.A. et al. Povedenie ioda v pochve [The behavior of iodine in soils], *Pochvovedenie*, 1977, no. 6, p. 32–41. (In Russian)
- Prokhorov V.M., Shchukin A.B., Kvetnaya O.M., Malkovich R.Sh. Issledovanie migratsii radioioda v pochve [Study of radioiodine migration in soil], *Pochvovedenie*, 1978, no. 1, p. 33–40. (In Russian)
- Proshin A.D., Doroshchenko V.N. Defitsit ioda sredi naseleeniya Bryanskoi oblasti [Iodine deficiency among the population of the Bryansk region], Bryansk, Lodomir Publ., 2005, 164 p. (In Russian)
- Proskuryakova G.F., Nikitina O.N. Uskorennyi variant kineticheskogo rodanidno-nitritnogo metoda opredeleniya mikrokolichestv ioda v biologicheskikh ob'ektakh [An accelerated version of the kinetic rhodanide-nitrite method for determining the trace amounts of iodine in biological objects], *Agrokhimiya*, 1976, no. 7, p. 140–143. (In Russian)

- Shakhtarin V.V., Tsyb A.F., Stepanenko V.F. et al. Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident, *Int. J. Epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4, p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205.
- Sidel'nikova V.D. [Geochemistry of selenium in the biosphere], *Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoi ekologii (Trudy Biogeokhimicheskoi laboratorii, vol. 23)* [Problems of biogeochemistry and geochemical ecology, Proceedings of the Biogeochemical Laboratory, vol. 23], Moscow, Nauka Publ., 1999, p. 81–99. (In Russian)
- Sindireva A.N., Stepanova O.V., Kekina E.G. [Ecological assessment of the action of selenium and iodine in the “soil-plant” system under the natural conditions of Western Siberia], *Trudy IX Mezhdunarodnoj biogeokhimicheskoi shkoly “Biogeokhimiya – nauchnaya osnova ustojchivogo razvitiya i sokhraneniya zdorovia cheloveka”* [Proceedings of the IX International Biogeochemical School “Biogeochemistry as a scientific basis of sustainable development and protection of human health”], Tula, TGPU Publ., 2019, p. 233–237. (In Russian)
- Tikhomirov F.A. *Radioekologiya ioda* [Radioecology of iodine], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 88 p. (In Russian)
- Tikhomirov F.A., Kasparov S.V. [Transformatsiya iodo-gumusovykh soedinenii i ikh rol' v dostupnosti radioioda rasteniya], *Tezisy dokladov I Vsesoyuznoy konferentsii po s.-kh. Radiologii*, [Abstracts of the First All-Russian Conference on Agricultural Radiology], Moscow, 1979, p. 157–158. (In Russian)
- Vinogradov A.P. Iod v prirode [Iodine in nature], *Priroda*, 1927, p. 670–678. (In Russian)
- Volkova N.I., Zhuchkova V.K. Polessko-Opolskie landshaftnye ecotony [Polessie-Opole landscape ecotones], *Bulletin of the Voronezh University, Ser. Geography and geology*, 2000, no. 1, p. 26–30. (In Russian)
- Vorob'ev G.T. *Pochvy Bryanskoi oblasti* [Soils of the Bryansk region], Bryansk, Grani Publ., 1993, 160 p. (In Russian)
- World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports*, no. 106, FAO, Rome.
- Zhong X., Gan Y., Deng Y. Distribution, origin and speciation of soil selenium in the black soil region of Northeast China, *Environ. Geochem. Health*, 2021, vol. 43, p. 1257–1271, DOI: 10.1007/s10653-020-00691-3.
- Zvonova I.A., Balonov M., Bratilova A.A. et al. Dozy oblucheniya shchitovidnoi zhelezy u naseleniya Rossii vsledstvie vypadenii radioaktivnogo ioda posle avarii na Chernobyl'skoi AES [Radiation doses of the thyroid gland across the population of Russia due to the fallout of radioactive iodine after the accident at the Chernobyl nuclear power plant], *Atomnaya energiya*, 2004, no. 4(96), p. 310–316. (In Russian)
- Zyryn N.G., Zborishchuk Yu.N. Soderzhanie ioda v pakhotnom sloe pochv Evropeiskoi chasti SSSR [The content of iodine in the arable soil layer over the European part of the USSR], *Pochvovedenie*, 1975, no. 9, p. 49–54. (In Russian)

Received 06.07.2021

Revised 10.03.2022

Accepted 27.06.2022