

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.47+550.42:616.441-006.6

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОДА И СЕЛЕНА В ПОЧВАХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ФАКТОР РИСКА ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАКОМ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

В.С. Баранчуков¹, В.Ю. Березкин², Л.И. Колмыкова³, В.Н. Данилова⁴, А.А. Долгонос⁵¹⁻⁵ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН¹⁻⁴ Лаборатория биогеохимии окружающей среды⁵ Лаборатория геохимии углерода имени Э.М. Галимова¹ Научн. сотр.; e-mail: baranchukov@geokhi.ru² Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: victor76@list.ru³ Науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kmila9999@gmail.com⁴ Науч. сотр.; e-mail: val1910@mail.ru⁵ Мл. науч. сотр.; e-mail: dolgonosov@geokhi.ru

Для территории России, в том числе Орловской области, характерен дефицит иода и селена в окружающей среде, что обуславливает повышенный риск развития рака щитовидной железы (РЩЖ) среди местного населения. Цель исследования – выявление особенностей пространственной неоднородности содержания иода и селена в компонентах окружающей среды (почвы, природные воды) Орловской области в их связи с заболеваемостью местного населения РЩЖ. В 52 сельских населенных пунктах были отобраны пробы пастбищных почв (20 см керн ($n = 54$)) и подземных вод питьевого назначения ($n = 104$). Показана высокая гетерогенность содержания элементов как в почвах, так и в природных водах. Концентрация I и Se оказалась ниже в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*; медианная концентрация I – 1,68 мг/кг; Se – 0,155 мг/кг), чем в черноземах выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*; I – 2,53 мг/кг; Se – 0,158 мг/кг). Во всех образцах почв концентрация иода была ниже порога оптимального уровня (5 мг/кг), а в 55% образцов и содержание селена было ниже оптимума (0,2–0,7 мг/кг). Распределение элементов в подземных водах в основном находится во взаимосвязи с водоносными горизонтами. Более высокие концентрации иода характерны для франского карбонатно-терригенного комплекса (I – 9,89 мкг/л; Se – 0,09 мкг/л), в то время как более низкие концентрации связаны с фаменским карбонатным комплексом (I – 3,83 мкг/л; Se – 0,2 мкг/л). Концентрация иода оказалась ниже оптимальной (10 мкг/л) в 67% проб подземных вод, а селена (2,5 мкг/л) – в 99%. В районах с низким и высоким риском заболеваемости РЩЖ наблюдались значимые различия концентраций иода и селена. Полученные данные позволяют оценить влияние элементного статуса компонентов окружающей среды на распределение заболеваемости РЩЖ среди местного населения.

Ключевые слова: биогеохимия, геохимическая экология, микроэлементы, эндемические заболевания, питьевые воды, почвы пастбищ

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.3

ВВЕДЕНИЕ

Рак щитовидной железы (РЩЖ) занимает 7-е место в мировой структуре онкологической заболеваемости. Годовая заболеваемость оценивается в 821 тыс. случаев [Sung et al., 2021]. Самые высокие показатели отмечаются в Восточной Азии, Полинезии и Северной Америке, а среди государств – на Кипре [Global Cancer Observatory..., 2022].

Стоит отметить, что в разных странах мира отмечена ярко выраженная пространственная неоднородность заболеваемости РЩЖ. Стандартизован-

ный по возрасту показатель (ASR) в мире варьирует в широких пределах: от 0,94 на 100 тыс. человек в Западной Африке до 23,1 в Восточной Азии [Global Cancer Observatory..., 2022]. Значительные различия выявлены также в масштабе регионов и административных единиц. Например, в Республике Корея в 2009–2013 гг. ASR составлял 17,9 в районах с низким уровнем заболеваемости РЩЖ, в то время как в кластерах с высоким уровнем заболеваемости РЩЖ ASR в 3,6 раза выше (65,9 на 100 тыс. чел.) [Jang et al., 2021]. Аналогичным образом, в Россий-

ской Федерации в 2021 г. в Ульяновской области был зафиксирован самый низкий ASR – 2,58, в то время как в Брянской области уровень заболеваемости был в 5,5 раза выше, а ASR составлял 14,3 [Злокачественные новообразования..., 2022]. В штате Вермонт (США) были выявлены районы с высокой заболеваемостью РЩЖ, причем в некоторых «горячих точках» она достигала 56 случаев на 100 тыс. населения, при среднем значении по штату 8,0, что свидетельствует о ярко выраженной пространственной неоднородности заболеваемости населения. Следует отметить, что корреляция с уровнем урбанизации или доступностью медицинских центров не была отмечена [Hanley, 2015].

Поскольку этиология рака щитовидной железы до сих пор остается неизвестной [Bogović Crnčić et al., 2020], определяют ряд факторов, вносящих вклад в рост риска развития РЩЖ, включая пол, генетическую предрасположенность, радиационное воздействие (включая облучение щитовидной железы ^{131}I), уровень потребления йода с пищей, индекс массы тела, уровень тиреостимулирующего гормона, аутоиммунные факторы [Bonnefond, Davies, 2014], образ жизни и диету [Bogović Crnčić et al., 2020]. Сочетанный эффект дефицита йода в окружающей среде и воздействия радиоактивного йода был изучен после аварии на Чернобыльской АЭС [Shakhtarin et al., 2003]. Таким образом, для выявления зон повышенного риска и осуществления целенаправленных мер по профилактике заболеваний необходимо учитывать пространственные факторы.

Йод – важнейший микроэлемент, необходимый для выработки гормонов щитовидной железы (ЩЖ), он входит в состав гормонов ЩЖ: тироксина (T_4 , $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{I}_4\text{NO}_4$) и трийодтиронина (T_3 , $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{I}_3\text{NO}_4$). Этот элемент играет фундаментальную биологическую роль в контроле роста и развития организмов [Ковальский, 1972]. Щитовидная железа нуждается в ежедневном поступлении йода для нормального функционирования и обеспечения нормального развития плода у млекопитающих. Помимо йода, в метаболизм тиреоидных гормонов вовлечен селен [Arthur, Beckett, 1994; Lossow et al., 2021]. Согласно опубликованным данным, природное несоответствие концентраций йода и селена в окружающей среде пороговым концентрациям является существенным фактором развития эндемических заболеваний ЩЖ у местного населения (иоддефицитные заболевания ЩЖ, такие как эндемический зоб, гипотиреоз) [Kolmykova, Korobova, 2019]. На отдельных территориях, подвергшихся загрязнению радиоактивным иодом вследствие уникальных техногенных катастроф (аварий на ядерных объектах), риск заболеваний ЩЖ может быть выше из-за со-

четанного воздействия природного дефицита йода и техногенного загрязнения [Cardis et al., 2005].

Многочисленными исследователями отмечается, что на территории Российской Федерации, включая ее европейскую часть, существует природный дефицит йода [Gerasimov et al., 1993, Ковальский, 1974]. Коробова и соавторы [Korobova et al., 2024] разделили области, расположенные на Восточно-Европейской равнине, на три группы в зависимости от концентрации йода в почвах. Согласно полученным данным, 53% регионов относятся к иоддефицитным, так как содержание йода в почве составляет менее 4,0 мг/кг. Еще 18%, включая исследуемую Орловскую область, имеют содержание йода от дефицитного (3,0 мг/кг) до нормального (> 5 мг/кг), а остальные 29% – от среднедефицитного (4,1 мг/кг) до нормального. Согласно данным о средней концентрации йода в моче (UIC), Россия, наряду с другими европейскими странами, такими как Эстония, Финляндия, Германия, Литва и Норвегия, классифицируется как страна с «недостаточным» потреблением йода [Global Scorecard of Iodine..., 2021]. Стоит отметить, что актуальность проблемы дефицита йода в окружающей среде возросла после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Выпадение радионуклидов было наиболее интенсивным в Беларуси, России и Украине, но происходило и во многих других европейских странах [Atlas..., 1998].

Цель исследования – выявление особенностей пространственной неоднородности содержания йода и селена в компонентах окружающей среды (почвы, природные воды) Орловской области в их связи с заболеваемостью местного населения РЩЖ.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Орловская область с населением около 700 тыс. человек в 2021 г. находилась на 7-м месте среди субъектов Российской Федерации по заболеваемости населения РЩЖ (код МКБ-10 C73, 8,88 случаев на 100 тыс.) [Злокачественные новообразования..., 2022], в период 2013–2017 гг. – на 12-м месте по заболеваемости другими патологиями ЩЖ (коды МКБ-10 E00-E07, 575,55 случаев на 100 тыс.) [Заболеваемость..., 2018]. Вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительная часть Орловской области была подвержена радиоактивному загрязнению [Данные..., 2022]. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (на 01.01.2020) в области достигает 137 кБк/м², что позволяет оценить [Zvonova et al., 2010] максимальное значение активности ^{131}I в почве на 10.05.1986 до 1975 кБк/м² (рис. 1Б).

Почвенный покров Орловской области характеризуется последовательной сменой зональных типов почв от дерново-подзолистых почв (*Umbric Albeluvisols Abruptic*) (типы почв по [Шишов и др.,

2004] и [International soil classification..., 2022]) в северо-западной части региона через серые (*Greyic Phaeozems Albic*) в центральной к черноземам (*Voronich Chernozems Pachic*) в юго-восточных районах области. Речные долины области заняты преимущественно аллювиально-луговыми кислыми почвами (*Umbric Fluvisols Oxyaquic*) (рис. 1В).

Основными источниками питьевых вод в регионе являются фаменский задонско-опуховский карбонатный комплекс (D_3zd-op) и франкий воронежско-ливенский карбонатно-терригенный комплекс (D_3vr-lv).

На локальных участках также эксплуатируются слабодонасный бат-келловейский терригенный комплекс (J_2bt-k) и водоносный альбсеноманский терригенный горизонт ($Kal-s$). В населенных пунктах, не имеющих других источников питьевой воды, для нецентрализованного водоснабжения используются частные скважины, пробуренные в аллювиальных четвертичных водоносных горизонтах [Отчет по теме..., 2001] (рис. 1Г).

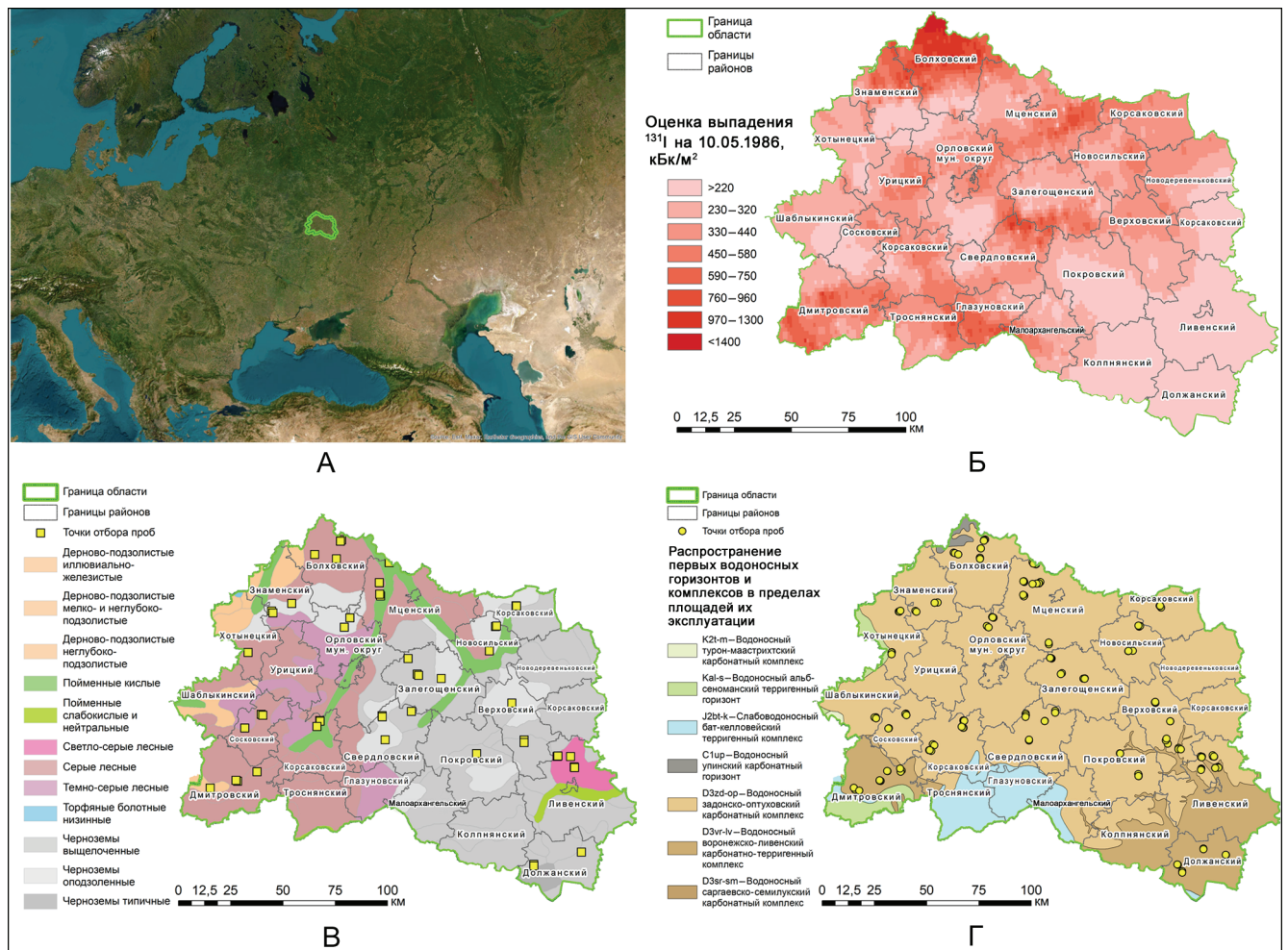


Рис. 1. Картосхемы Орловской области с расположением точек отбора фактического материала:

А – географическое расположение; Б – рассчитанная активность ^{131}I [Данные..., 2022] по формуле [Zvonova et al., 2010]; В – типы почв [Иванов, Шоба, 2014]; Г – основные эксплуатируемые водоносные горизонты [Отчет по теме..., 2007]

Fig. 1. Maps of the Oryol region with soil and groundwater sampling points:

А – geographical location; Б – estimated radioiodine contamination [Dannye..., 2022], recalculated according to [Zvonova et al., 2010]; В – soil types [Ivanov et al., 2014]; Г – main aquifers [Otchet po teme..., 2007]

Водоносные породы задонско-опуховского (D_3zd-op) комплекса состоят из сцементированных, трещиноватых известняков и доломитов с редкими прослоями мергелей и глин. В центральной и северной частях региона встречаются прослой сильно-трещиноватых и кавернозных песков и песчаников. Воронежско-ливенский (D_3vr-lv) комплекс состо-

ит из кавернозных и трещиноватых известняков с подчиненными прослоями глин. В южной части комплекса среди известняков прослоями залегают пески, песчаники и алевролиты [Отчет о результатах работ..., 2007]. В верхней части комплекса отсутствуют водоупорные слои и имеется гидравлическая связь с водами задонско-опуховского

водоносного горизонта. В нижней части комплекса залегают глинистые отложения петинских водоупоров (мощность слоя не более 7 м).

Выбор сельских населенных пунктов для исследования геохимических параметров производился с учетом характеристики почвенного покрова, водоносных горизонтов, используемых для питьевого водоснабжения, и уровня загрязнения радионуклидами во время аварии на ЧАЭС (по картографическим данным). Отбор образцов почв и проб подземных вод проводился в летний период 2022–2023 гг. в 52 сельских населенных пунктах, расположенных в 17 из 24 районов области. Всего было отобрано 54 образца почв и 104 пробы подземных вод. Координаты точек пробоотбора фиксировались в полевых условиях с помощью навигатора GPSmap 62stc (Garmin, США).

Образцы почв отбирали из верхнего 20-сантиметрового слоя тростьевым буром в интервалах глубин 0–5, 5–10 и 10–20 см. Отбор проб вод проводился согласно ГОСТ Р 59024-2020 в тех же населенных пунктах из различных источников, включая 53 пробы водопроводной воды, 30 проб из уличных водоразборных колонок, 12 проб из колодцев, 7 проб из родников и 2 пробы из частных скважин.

Содержание иода определяли ускоренным вариантом кинетического роданидно-нитритного метода [Проскурякова, Никитина, 1976] на фотокolorиметре КФК-3-01-«ЗОМЗ» (ЗОМЗ, Россия), содержание селена – флуориметрическим методом МУК 4.1.033-95 на спектрофлуориметре MPFS-2A (Hitachi, Япония). Содержание органического углерода в почве определяли бихроматным методом

Тюрина по ГОСТ 26213-2021. Подготовка образцов почв проводилась по стандартным методикам в лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИРАН. Анализ данных проводился с использованием Microsoft Excel и TIBCO STATISTICA 13.3, пространственный анализ – с помощью ESRI ArcGIS Desktop 10.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная неоднородность содержания иода и селена в пастбищных почвах. Результаты проведенных исследований позволили подтвердить значительное варьирование концентраций изучаемых элементов в пастбищных почвах. Содержание иода в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*) в слое 0–20 см имело межквартильный интервал (IQR) 0,92–2,37 мг/кг, медиану (Me) 1,68 мг/кг, селена – IQR 0,2–0,3 мг/кг, Me 0,155 мг/кг. В черноземах (*Voronic Chernozems Pachic*) содержание иода характеризовалось IQR 1,89–3,05 мг/кг, Me 2,53 мг/кг, селена – IQR 0,08–0,24 мг/кг, Me 0,158 мг/кг). Содержание иода в почвах увеличивалось с глубиной в черноземах (*Voronic Chernozems Pachic*), что может быть связано с потерей иода в верхних слоях этого типа почв, вследствие более интенсивного выпаса скота на более плодородных почвах (рис. 2А). Содержание селена в этих почвах также увеличивалось от слоя 0–5 см (Me 0,170 мг/кг) до слоя 10–20 см (Me 0,201 мг/кг) (рис. 2Б). Кроме того, была обнаружена низкая значимая положительная корреляция между содержанием иода и уровнем органического вещества ($R = 0,342$, $p = 0,00001$; рис. 3).

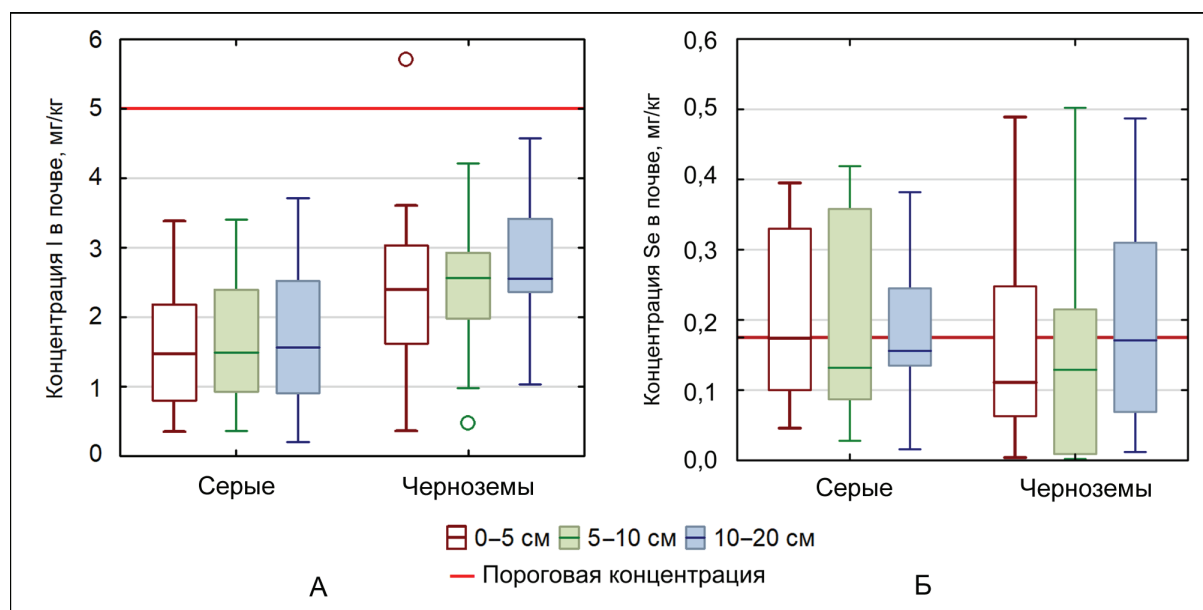


Рис. 2. Содержание иода (А) и селена (Б) в пастбищных почвах послойно

Fig. 2. Iodine (A) and Selenium (Б) distribution in pasture soil layers

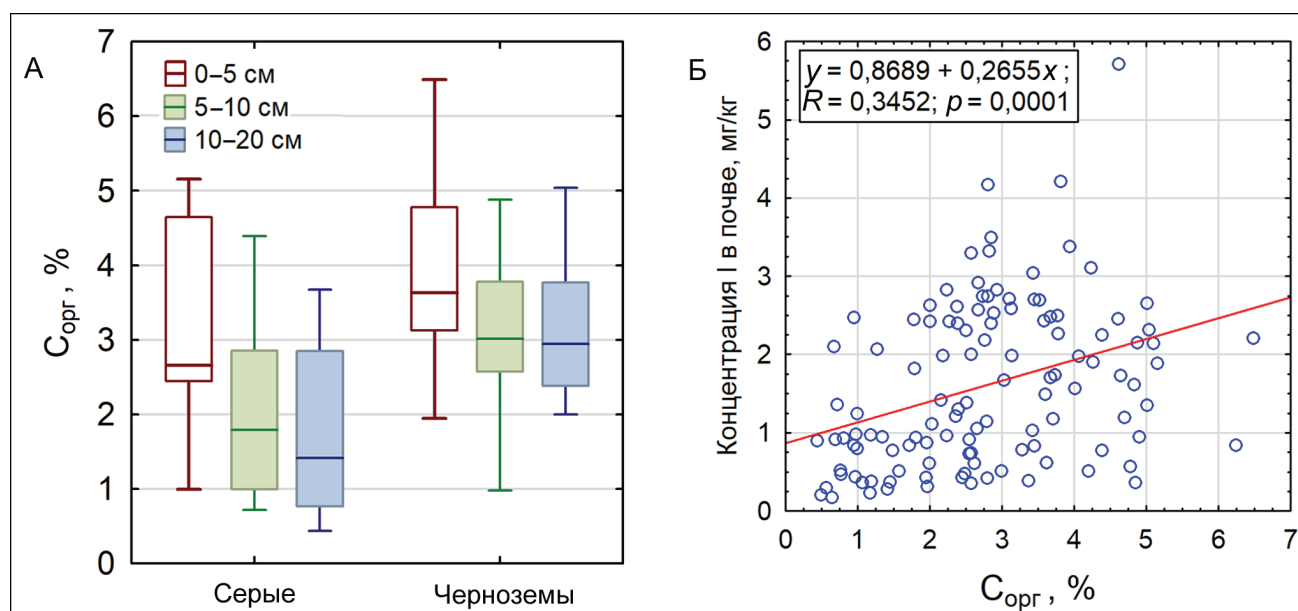


Рис. 3. Распределение органического углерода в зональных типах почв Орловской области послойно (А) и зависимость содержания иода от органического углерода (Б)

Fig. 3. SOC distribution in zonal soil layers (A) and relation between the iodine content and SOC (Б)

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) значительно варьировало как в черноземах выщелоченных (*Voronich Chernozems Pachic*) (0,98–6,49%), так и в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*) (0,44–5,15%), с максимальным значением в нижних слоях 10–20 см (рис. 3). Возможно, широкие пределы варьирования содержания органического вещества могли быть обусловлены здесь не природными факторами, а использованием почв под пастбище. Неспецифичные для данного генетического горизонта уровни органического вещества могут быть связаны с удобрением пастбищ в результате выпаса скота. Стоит отметить, что выпас может привести и к снижению уровня органического углерода в верхних горизонтах за счет эрозии.

Пространственная неоднородность концентраций иода и селена в подземных водах. Содержание иода и селена в пробах отобранных вод варьировало (IQR) от 2,7 до 13,6 мкг/л (Me 4,34 мкг/л) и от 0,07 до 0,38 мкг/л (Me 0,21 мкг/л) соответственно. Подземные воды фаменского задонско-оптуховского карбонатного комплекса характеризовались более низкими значениями концентраций иода (IQR 2,41–9,12; Me 3,83 мкг/л; рис. 4А), в отличие от вод франского воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса (IQR 1 3,93–22,7; Me 9,89 мкг/л). Сходные данные были получены в более ранних исследованиях химического состава подземных вод на территории Брянской области [Колмыкова, 2017]. Как и в случае с почвами, распределение селена в водах показало противоположную тенденцию (фаменский комплекс: IQR

0,07–0,38; Me 0,2 мкг/л; франский комплекс: IQR 0,05–0,29; Me 0,09 мкг/л; рис. 4Б). Анализ соотношений между содержанием иода и селена в подземных водах и другими гидрохимическими параметрами вод не выявил статистически значимых корреляционных связей.

Пространственная оценка вклада природных геохимических факторов в распространение рака щитовидной железы. Для исследования геохимических факторов, определяющих пространственную неоднородность заболеваемости РЩЖ на исследуемой территории, использовались два геохимических индикатора: природный иододефицит и загрязнение территории радиоизотопом иода.

Статистическая значимость вклада данных индикаторов в пространственную неоднородность заболеваемости РЩЖ оценивалась путем разделения исследуемой территории на районы с различным уровнем кумулятивного риска, рассчитываемого на основе стандартизованного показателя заболеваемости. По данным Иванова и др. [2005], районы с ASR менее 20 на 1 млн (накопленный риск менее 0,15%) для мужского населения были отнесены к районам низкого риска (9 районов), а остальные 15 – к районам высокого риска. Для женского населения семь районов с ASR менее 80 на 1 млн (накопленный риск менее 0,6%) были отнесены к районам низкого риска, а остальные 17 – к районам высокого риска.

Поскольку по данным статистического наблюдения Росстата [Выборочное наблюдение..., 2013] в сельских населенных пунктах Орловской области 89,5% домохозяйств используют централизованное

водоснабжение для питьевых целей, из них 65,4% пользуются водопроводной водой в домах и 24,1% – водоразборными колонками, в качестве индикатора природного дефицита иода и селена в питьевых водах использовалась их концентрация в водах централизованного водоснабжения. Основными продуктами питания, производимыми сельским населением региона в домашних условиях, является картофель – его выращивают 88,8% сельских домохозяйств, 59,1% домохозяйств производят яйца, а 55,9 и 42,6% выращивают скот и птицу на мясо соответственно. В результате почти 78% рациона

сельского населения состоит из продуктов, выращенных на местной почве, поэтому вторым индикатором дефицита микроэлементов служит их концентрация в почвах.

Учитывая, что большинство изучаемых геохимических показателей имеют распределение, отличное от нормального (по тесту Шапиро–Уилко) [Shapiro, Wilk, 1965], использовался ранговый *U*-критерий Манна–Уитни [Mann, Whitney, 1947] для определения статистически значимых различий параметров в районах с разным накопленным риском заболеваемости РЩЖ (табл. 1).

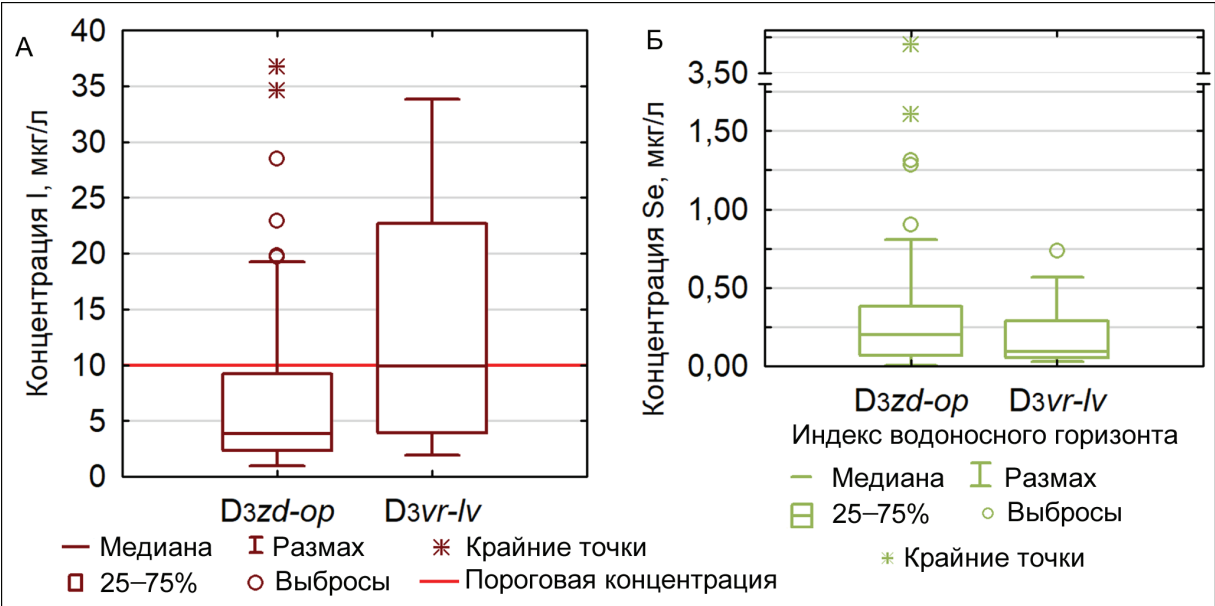


Рис. 4. Распределение иода (А) и селена (Б) в подземных водах

Fig. 4. Iodine (A) and Selenium (Б) distribution in groundwater

Таблица 1

Результаты теста Шапиро–Уилко для изученных геохимических параметров

Геохимический параметр			Статистика Шапиро–Уилка	Уровень значимости
Загрязнение почвы ¹³¹ I (на 10.05.1986)			0,8850	<0,0001
Концентрация в подземных водах	I		0,7688	<0,0001
	Se		0,4975	<0,0001
Концентрация в почвах	I	0–5 см	0,9187	0,043
		5–10 см	0,9685	0,280
		10–20 см	0,9725	0,399
	Se	0–5 см	0,9411	0,117
		5–10 см	0,9030	0,013
		10–20 см	0,9339	0,076

Значение *U*-критерия Манна–Уитни (табл. 2) показывает, что в районах с более высоким уровнем заболеваемости отмечался и более высокий уровень загрязнения почв ¹³¹I (рис. 5А, 5Б), о чем

свидетельствуют положительные значения *Z*. По данным, представленным на рис. 5В и 5Г, можно сделать вывод, что для районов с высоким уровнем заболеваемости, как мужского, так и женского на-

селения, характерна низкая концентрация иода в водах систем централизованного водоснабжения и 10–20 см слое почвы. Это позволяет предположить, что на заболеваемость РЩЖ в регионе после аварии на Чернобыльской АЭС также влияет дефицит иода в окружающей среде. Распределение селена в окружающей среде на территориях с высоким и низким риском РЩЖ, по-видимому, обратно распределению иода (рис. 6).

Полученные данные свидетельствуют о значимой разнице в дефиците Se между районами с низким и высоким риском РЩЖ. Следует отметить, что заболеваемость женщин, по-видимому, статистически связана с концентрацией селена в питьевой воде, а заболеваемость мужчин – с его содержанием в почве. По-видимому, это объясняется существующими различиями в пищевых привычках сельского населения в зависимости от пола.

Таблица 2

Статистическая значимость различий распределения геохимических показателей в районах Орловской области с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ

Геохимический показатель		Мужчины					Женщины					
		<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Nh</i>	<i>NI</i>	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Nh</i>	<i>NI</i>	
Загрязнение почвы ¹³¹ I на 10.05.1986		224666	6,015	0,000	737	744	208154	7,748	0,000	812	669	
Концентрация в подземных водах	I	479,0	–3,273	0,001	34	49	602,0	–1,492	0,136	27	56	
	Se	713,5	1,102	0,270	34	49	551,5	1,983	0,047	27	56	
Концентрация в почвах	I	0–5 см	233,0	0,095	0,924	19	25	206,0	–0,656	0,512	18	26
		5–10 см	222,0	–0,135	0,893	19	24	177,0	–1,169	0,242	18	25
		10–20 см	211,0	0,177	0,860	19	23	151,0	–1,639	0,100	18	24
	Se	0–5 см	48,5	2,182	0,029	12	16	87,5	–0,438	0,662	13	15
		5–10 см	45,0	2,344	0,019	12	16	85,0	–0,553	0,580	13	15
		10–20 см	45,0	2,344	0,019	12	16	89,5	0,345	0,730	13	15

Примечание. *U* – значение *U*-критерия Манна-Уитни, *Z* – значение *U*-критерия, приведенное к нормальному распределению, *p* – уровень значимости, *NI* – число проб (образцов) в районах с низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ, *Nh* – число проб (образцов) в районах с суммарным риском заболеваемости РЩЖ. Жирным шрифтом выделены параметры $p \leq 0,100$.

Было показано, что селен выступает антагонистом иода как в почвах, так и в подземных водах исследуемого региона, что может обуславливать их совместное влияние на развитие заболеваний щитовидной железы. Концентрация иода во всех почвенных образцах в слое 0–20 см была ниже порогового уровня (5–40 мг/кг), установленного Ковальским и Андриановой [1970]. В 55% исследованных образцов содержание селена было ниже биогеохимической нормы (0,2 мг/кг) [Боев, 2013], при этом лишь в одном из 54 образцов концентрация этого микроэлемента превышала норму ($>0,7$ мг/кг) для почв.

По данным Синдиревой и др. [2021] в половине образцов серых почв (*Greyic Phaeozems Albic*) и в 60% образцов черноземов выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*) в слое 0–20 см обнаружены концентрации селена ниже оптимального уровня (0,175–3,0 мг/кг). Медианные значения селена в большинстве исследованных нами зональных почв Орловской области также менее 0,175 мг/кг, что позволяет отнести Орловскую область к зоне селенодефицита. К области оптимума по селену здесь относятся только сельскохозяйственные угодья на

пойменных почвах и на дерново-подзолистых почвах (занимающих менее 4% площади области). Стоит отметить, что, несмотря на практически одинаковую удаленность от океана и, как следствие, одинаковое количество иода, поступающего в почвы с атмосферными осадками и сухими выпадениями, более интенсивная аккумуляция иода наблюдается в черноземах выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*), чем в черноземах оподзоленных (*Greyic Phaeozems Albic*). Данное различие может быть связано с относительно высоким содержанием органического вещества в верхних горизонтах черноземов выщелоченных. Иод в почвах прочно связывается с органическими кислотами гумусового происхождения, образуя при этом малоподвижные комплексы в *Voronic Chernozems Pachic*. Эти комплексы, однако, остаются доступными для растений, чего не наблюдается в почвах *Greyic Phaeozems Albic*, где потери водорастворимых и летучих соединений гораздо выше. Косвенно это подтверждается более высокими значениями содержания органического вещества в *Voronic Chernozems Pachic* по всем исследованным глубинам.

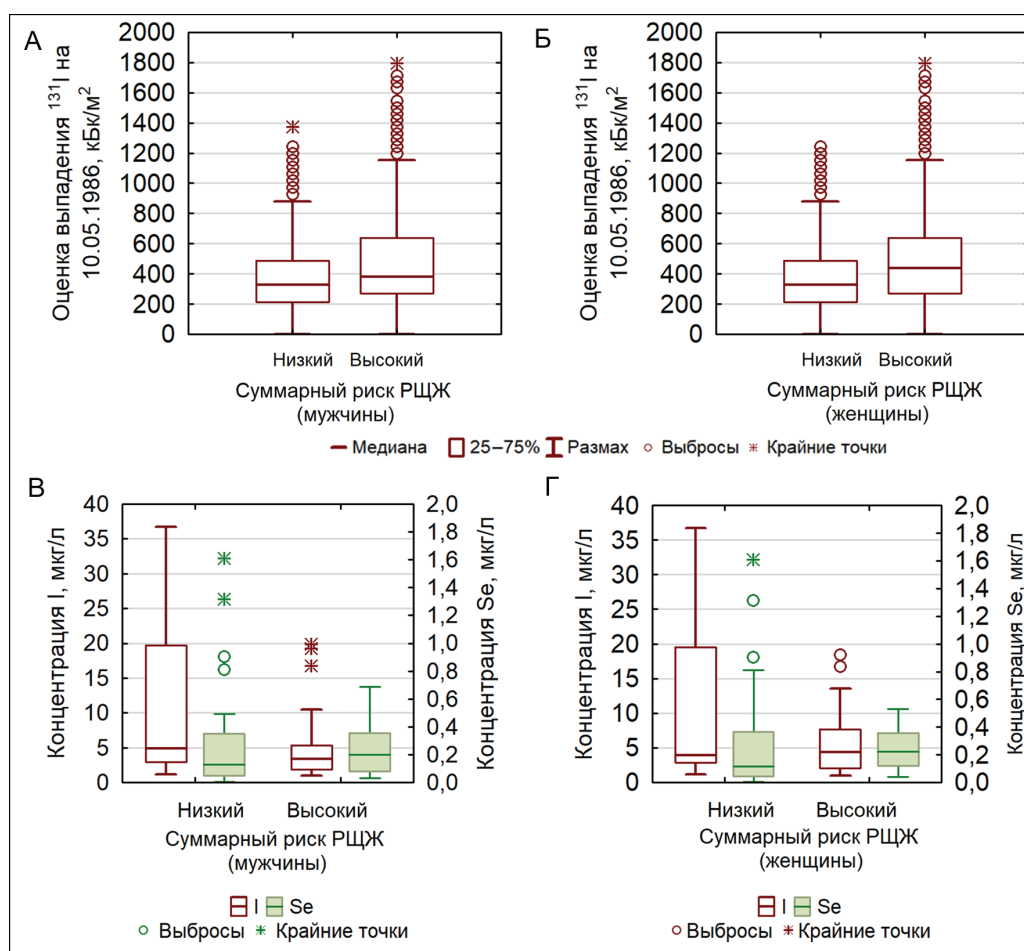


Рис. 5. Распределение рассчитанной активности ^{131}I в сельских населенных пунктах районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (А) и женщин (Б), а также концентраций I и Se в водах централизованного водоснабжения сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (В) и женщин (Г)

Fig. 5. Distribution of calculated ^{131}I activity in rural communities in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (А) and women (Б); as well as I and Se concentrations in centralized water supply of rural communities in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (В) and women (Г)

Отбор образцов исследуемых типов почв производился только на пастбищных угодьях, используемых в настоящий момент для выпаса скота. Высокая степень освоенности исследуемой территории в исторический период позволяет предполагать, что ранее эти земли могли использоваться под пашню. Косвенно это подтверждают полученные авторами низкие медианные значения концентрации органического углерода даже для черноземов (для черноземов выщелоченных – 2,5%; для черноземов оподзоленных – 2,6%), что ниже, чем в литературных данных для этих типов почв [Отчет о научно-исследовательской работе..., 2013].

Полученные данные по распределению иода и селена в подземных водах верхнедевонской карбонатной толщи свидетельствуют о существовании неоднородности литолого-геохимических условий водоносных горизонтов по содержанию типоморфных элементов в водах фаменского (задонско-опту-

ховского (D_3zd-op)) и франского ярусов (воронежско-ливенского (D_3vr-lv)). Обнаружено различие в соотношении Ca/Mg и показателях электропроводности (5,0, 0,53 мСм/см для D_3vr-lv и 3,5, 0,66 мСм/см для D_3zd-op). Некоторое обогащение напорных вод воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса иодом может быть связано с его значительной мощностью (151–193 м) по сравнению с задонско-оптуховским карбонатным комплексом (60–80 м), что обусловлено более высоким содержанием в осадочном слое органического вещества морского происхождения (основной источник иода в подземной гидросфере).

Существование водоупорного горизонта (петинский горизонт D_3pt) в подошве воронежско-ливенского комплекса создает условия для удержания подвижных форм элементов в растворе, препятствуя их миграции в нижележащие горизонты с фильтрационными водами.

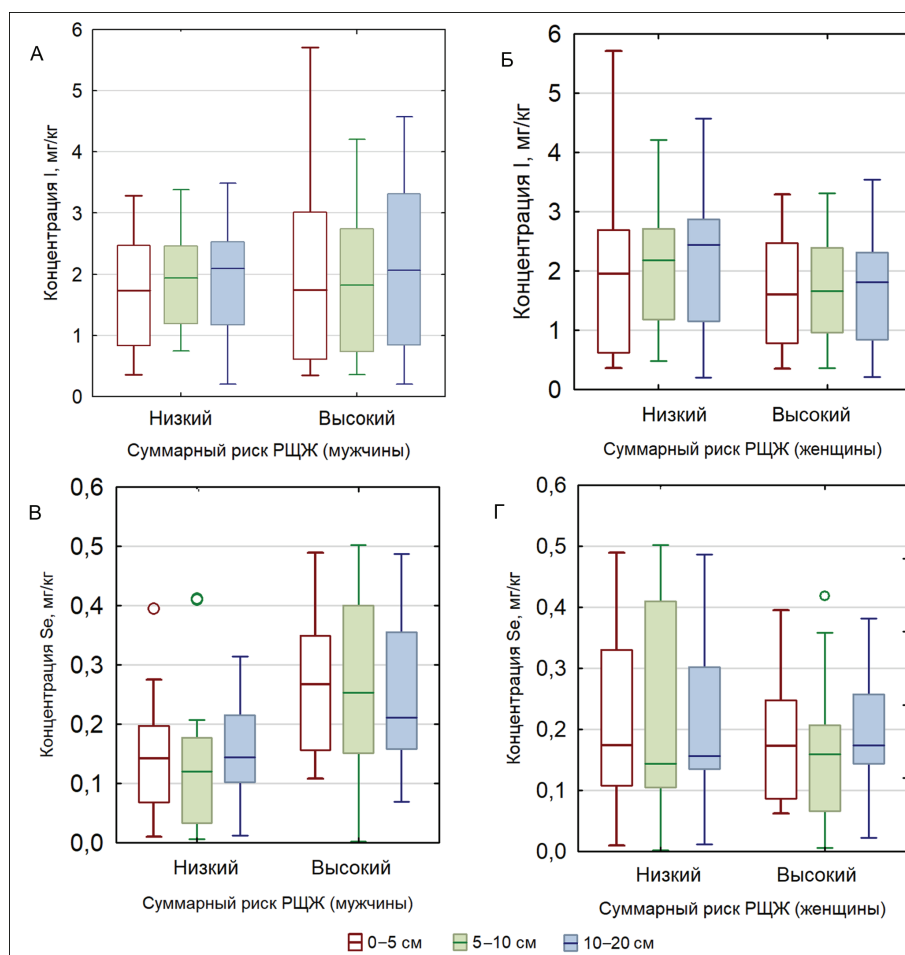


Рис. 6. Распределение концентраций иода в почвах пастбищ сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (А) и женщин (Б), а также селена в почвах пастбищ сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (В) и женщин (Г)

Fig. 6. Distribution of concentrations of: iodine in soils of rural pastures in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (А) and women (Б); selenium in soils of rural pastures in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (В) and women (Г)

Согласно результатам анализов, ни в одной из отобранных проб вод не было зафиксировано превышение предельно допустимых концентраций иода (125 мкг/л) и селена (10 мкг/л) [СанПиН 1.2.3685-21]. Хотя действующими российскими санитарными правилами и нормами не установлены минимальные концентрации химических элементов в питьевой воде, следует отметить, что в 67% проб концентрация иода была ниже оптимального уровня (10 мкг/л [Турецкая, Данилейченко, 1965]), в то время как дефицит селена был установлен для 99% проб (<2,5 мкг/л [Никитина и др., 1995]).

Дефицит иода выявлен в северной и центральной частях Орловской области, в которых распространены серые почвы (*Greyic Phaeozems Albic*), а верхнедевонские отложения представлены главным образом задонско-оптуховским водоносным комплексом. Кроме того, указанные территории являются наиболее пострадавшими от аварии на

Чернобыльской АЭС и характеризуются наиболее высоким стандартизованным по возрасту уровнем заболеваемости РЩЖ [Иванов и др., 2005].

Статистическая значимость различий геохимических индикаторов риска РЩЖ (природные – дефицит иода в питьевой воде и почвах пастбищ; техногенные – загрязнение территории ¹³¹I после аварии на ЧАЭС) в районах исследуемой области соответствует распределению тех же параметров в зонах с минимальной и максимальной заболеваемостью среди сельского населения соседней Брянской области [Korobova et al., 2023]. По данным Дрозд и др. [2015], самые низкие уровни иода в моче отмечены в Могилевской области Республики Беларусь, что может являться следствием дефицита иода в почве этой территории. Для Российской Федерации были обнаружены различия в отношении между уровнем радиоактивного загрязнения почв и дозой облучения ЩЖ в Брянской и Тульской обла-

стях, определяющиеся, вероятно, различным типом почв (дерново-подзолистые (*Umbric Albeluvisols Abruptic*) и серые (*Greyic Phaeozems Albic*) в Брянской области и черноземы (*Voronic Chernozems Pachic*) в Тульской области [Stepanenko et al., 1996]).

Принимая во внимание вклад проведения скрининговых исследований, в т. ч. ультразвуковой диагностики, в показатель роста общей заболеваемости РЦЖ, пространственная неоднородность распространения данной патологии внутри региона может быть связана с изучаемыми геохимическими факторами. Различия в распределении геохимических показателей между районами с высоким и низким риском развития РЦЖ у мужчин и женщин обуславливаются различиями в рационах [Choi, Kim, 2014]. Среди продуктов, выращиваемых в условиях домашних хозяйств, в рационе мужчин на мясные продукты приходится на 31% больше, чем у женщин, в то время как на овощи и фрукты приходится на 24% меньше [Выборочное наблюдение..., 2013].

В проведенном исследовании показано, что на пространственное распределение заболеваемости РЦЖ может оказывать влияние сочетание природных и антропогенных геохимических факторов. Полученные данные могут быть использованы для оценки вклада природно-техногенных факторов в распространенность эндемических заболеваний РЦЖ среди сельского населения с учетом особенностей поступления иода и селена. Данная информация может быть применена для разработки адресных рекомендаций по коррекции дефицита иода и селена.

ВЫВОДЫ

Отмечена положительная корреляция между концентрацией иода в почвах и содержанием органического углерода, а также отрицательная корреляция с концентрацией селена. Установлено, что черноземы (*Voronic Chernozems Pachic*) Орловской области отличаются более высоким содержанием иода, в то время как для серых почв (*Greyic Phaeozems Albic*) характерен относительно более высокий уровень селена. Показана неоднородность распределения изучаемых элементов в подземных водах верхнедевонской карбонатной толщи. Относительно обогащенными иодом оказались подземные воды франского воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса, при этом некоторое увеличение содержания селена характерно для вод фаменского задонско-оптуховского карбонатного комплекса. Несмотря на широкое варьирование значений концентрации изучаемых элементов, большинство пастбищных почв и подземных вод, используемых для питьевого назначения, дефицитны как по иоду, так и по селену.

Распределение накопленного риска заболеваемости РЦЖ среди сельского населения региона может быть связано с пространственной неоднородностью концентраций иода и селена в нижних звеньях трофической цепи, а также с уровнем радиоактивного загрязнения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН). Авторы благодарят А.С. Костина и М.Л. Голвина за помощь в пробоподготовке и химическом анализ проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боев В.А. Селен в почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области // Вестник Тюменского гос. ун-та. Серия: Экология. 2013. № 12. С. 112–120.
- ГОСТ 26213-2021 Почвы. Методы определения органического вещества. Официальное издание. М.: РСТ, 2021. 11 с.
- ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб (издание с Изменением № 1). Официальное издание. М.: РСТ, 2023. 40 с.
- Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации цезием – 137, стронцием – 90 и плутонием – 239+240 / под ред. С.М. Вакуловского, подг. В.Н. Яхрюшин. Обнинск: НПО «Тайфун», 2022. 233 с.
- Заболеваемость всего населения России в 2017 году. Статистические материалы. М.: Центральный научно-исследовательский ин-т организации и информатизации здравоохранения Минздрава России, 2018. 140 с.
- Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2022. 252 с.
- Иванов А.В., Шоба С.А. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Тула: Гриф и К, 2014. 768 с.
- Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максютов М.А. и др. Основные результаты радиационно-эпидемиологического анализа данных РГМДР (к 20-летию Чернобыля) // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2005. Спецвыпуск. С. 6–111.
- Шишов Л.Л., Герасимова М.И., Тонконозов В.Д. и др. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 180 с.

- Ковальский В.В. Биологическая роль иода // Научн. тр. ВАСХНИЛ. 1972. С. 3–32.
- Ковальский В.В. Геохимическая экология. М., 1974. 282 с.
- Колмыкова Л.И. Особенности водной миграции иода и селена в геохимически контрастных ландшафтах Брянской области: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2017. 179 с.
- МУК 4.1.033-95 Методы контроля. Химические факторы. Определение селена в продуктах питания. Официальное издание. М.: Информационно-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1995. 5 с.
- Никитина Л.П., Иванов В.Н., Аникина Л.В. Селен в горных породах и почвах // Селен в жизни человека и животных. М.: ВИНТИ РАН, 1995. С. 17–19.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка и практическая реализация биологизированных систем земледелия, обеспечивающих существенное снижение энерго- и ресурсозатрат и экологостабилизирующий эффект в агроэкосистемах (заключительный)» / отв. исп. Н.В. Парахин. Орёл: Орловский государственный аграрный университет, 2013. 225 с.
- Отчет о результатах работ по объекту «Составление карт районирования территории ЦФО масштаба 1 : 500 000 (с врезками масштаба 1 : 200 000) для оптимизации производства региональных гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических работ в период 2005–2010 годов»: в 2 т. / отв. исп. Г.В. Лященко, В.В. Куренной. М.: Геоцентр-Москва, 2007. Т. 1. 106 с.
- Отчет по теме «Составление комплекта гидрогеологических карт масштаба 1 : 500 000 территории деятельности Центрального РГЦ»: в 5 т. Т. 1. Кн. 9. Пояснительная записка к гидрогеологическим картам: «Водоносные горизонты кайнозойских отложений» и «Воды мезозойских, палеозойских и докембрийских отложений». Масштаб 1 : 500 000. Орловская область / сост. Н.С. Викторова. М.: Межрегиональный центр по геологической картографии «Геокарт», 2001. 28 с.
- Проскурякова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств иода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. Т. 7. С. 140–143.
- Синдирева А.В., Котченко С.Г., Гурьев Н.Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38.
- Турецкая Э.С., Данилейченко В.А. Иод, бром, кобальт и медь в питьевых водах горного района и эндемическая болезнь // Микроэлементы в животноводстве и медицине. Киев: Здоровье, 1965. С. 62–67.
- Atlas of Caesium 137 deposition on Europe after the Chernobyl accident*, M. de Cort (ed.), Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 63 p.
- Arthur J.R., Beckett G.J. Symposium 2 Newer aspects of micronutrients in at risk groups: New metabolic roles for selenium, *Proc. Nutr. Soc.*, 1994, vol. 53, no. 3, p. 615–624, DOI: 10.1079/PNS19940070.
- Bogović Crnčić T., Ilić Tomaš M., Giroto N. Risk Factors for Thyroid Cancer: What Do We Know So Far? *Acta clinica Croatica*, 2020, no. 59, p. 66–72, DOI: 10.20471/acc.2020.59.s1.08.
- Bonnefond S., Davies T.F. Thyroid Cancer – Risks and Causes, *Oncology & Hematology Review (US)*, 2014, vol. 10, no. 02, p. 144, DOI: 10.17925/OHR.2014.10.2.144.
- Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V. et al. Risk of Thyroid Cancer After Exposure to 131 I in Childhood, *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 724–732, DOI: 10.1093/jnci/dji129.
- Choi W.J., Kim J. Dietary Factors and the Risk of Thyroid Cancer: A Review, *Clin Nutr Res.*, 2014, vol. 3, no. 2, p. 75, DOI: 10.7762/cnr.2014.3.2.75.
- Gerasimov G., Judenitch O., Dedov I. Iodine Deficiency Disorders and Endemic Goiter in the Commonwealth of Independent States (CIS), *Iodine Deficiency in Europe: A Continuing Concern NATO ASI Series*, F. Delange, J.T. Dunn, D. Glinioer (eds.), Boston, MA, Springer US, 1993, p. 347–351, DOI: 10.1007/978-1-4899-1245-9_43.
- Drozd V.M., Saenko V.A., Brenner A.V. et al. Major Factors Affecting Incidence of Childhood Thyroid Cancer in Belarus after the Chernobyl Accident: Do Nitrates in Drinking Water Play a Role? *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 9, e0137226, DOI: 10.1371/journal.pone.0137226.
- Jang J., Yoo D.-S., Chun B.C. Spatial distribution and determinants of thyroid cancer incidence from 1999 to 2013 in Korea, *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 22474, DOI: 10.1038/s41598-021-00429-w.
- Hanley J.P., Jackson E., Morrissey L.A. et al. Geospatial and Temporal Analysis of Thyroid Cancer Incidence in a Rural Population, *Thyroid*, 2015, vol. 25, no. 7, p. 812–822.
- International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 4th edition, Vienna, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 236 p.
- Kolmykova L.I., Korobova E.M. Iodine and selenium in natural waters as a risk factor in manifestation of endemic thyroid diseases (review), *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 2, p. 5–13, DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-005-013.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kurnosova I.V. et al. Spatial geochemical differentiation of the iodine-induced health risk and distribution of thyroid cancer among urban and rural population of the Central Russian plain affected by the Chernobyl NPP accident, *Environ. Geochem. Health*, 2022, vol. 44, no. 6, p. 1875–1891, DOI: 10.1007/s10653-021-01133-4.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kolmykova L.I. Theoretical and Methodological Approaches to the Analysis of the Spatial Distribution of Endemic Diseases of Geochemical Nature, *Geochem. Int.*, 2023, vol. 61, no. 10, p. 1074–1086, DOI: 10.1134/S0016702923100063.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Bech J. Cartographic evaluation of the risk of natural elements' deficiency in the soil cover provoking spatial variation of the endemic morbidity level (on example of thyroid morbidity among population of the Central Federal District, Russia), *Environ. Geochem. Health*, 2024, vol. 46, no. 3, art. 109, DOI: 10.1007/s10653-024-01912-9.
- Lossow K., Renko K., Schwarz M. et al. The Nutritional Supply of Iodine and Selenium Affects Thyroid Hormone Axis Related Endpoints in Mice, *Nutrients*, 2021, vol. 13, no. 11, p. 3773, DOI: 10.3390/nu13113773.
- Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, no. 1, p. 50–60, DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

- Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 1965, vol. 52, no. 3–4, p. 591–611, DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.
- 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. *International journal of epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4., p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205
- Stepanenko V., Kondrashov A., Yaskova E. et al. The reconstruction of thyroid dose following Chernobyl, *The radiological consequences of the Chernobyl accident*, 1996, p. 7–12.
- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, *CA A Cancer J Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, p. 209–249, DOI: 10.3322/caac.21660.
- Global Scorecard of Iodine. Nutrition in 2020 in the General Population Based on School-Age Children (SAC), IGN, Ottawa, 2021, 14 p.
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V. et al. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 1, p. 8–15, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.
- Электронные ресурсы
- Выборочное наблюдение рациона питания населения. 2013. URL: https://rosstat.gov.ru/free_doc/new_site/food1/survey0/index.html (дата обращения 17.07.2024).
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Официальный интернет-портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения 06.12.2024).
- Global Cancer Observatory: Cancer Today, URL: <https://gco.iarc.who.int/today> (access date 17.07.2022).

Поступила в редакцию 22.08.24
После доработки 05.10.2024
Принята к публикации 26.11.2024

DISTRIBUTION OF IODINE AND SELENIUM IN SOILS AND GROUNDWATER OF RURAL AREAS IN THE ORYOL REGION AS A RISK FACTOR FOR THYROID CANCER

V.S. Baranchukov¹, V.Yu. Berezkin², L.I. Kolmykova³, V.N. Danilova⁴, A.A. Dolgonosov⁵

¹⁻⁵ V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry

¹⁻⁴ Laboratory of Environmental Biogeochemistry

⁵ E.M. Galimov Laboratory of Carbon Geochemistry

¹ Scientific Researcher; e-mail: baranchukov@geokhi.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: victor76@list.ru

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: kmila9999@gmail.com

⁴ Scientific Researcher; e-mail: val1910@mail.ru

⁵ Junior Scientific Researcher; e-mail: dolgonosov@geokhi.ru

The environmental iodine and selenium deficiency is prevalent in Russia, including the Oryol region, leading to an increased risk of thyroid cancer (TC) among the local population. The aim of the research is to investigate the spatial heterogeneity of the TC incidence in relation to the environmental distribution of iodine and selenium in the Oryol region. Samples were collected from 52 rural settlements (20 cm layer of pasture soils ($n = 54$) and drinking groundwater ($n = 104$)). The investigation revealed a high heterogeneity of the concentration of the elements both in soils and in natural water. The concentrations of I and Se were found to be lower in *Greyic Phaeozems Albic* (median I content: 1,68 mg/kg; Se: 0,155 mg/kg) than in *Voronic Chernozems Pachic* (I: 2,53 mg/kg; Se: 0,158 mg/kg). The iodine concentrations in all soil samples were lower than the optimal level (5 mg/kg), while Se content was lower than the optimum (0,2–0,7 mg/kg) in 55% of samples. The distribution of the elements in the groundwater is primarily in correlation with particular aquifers. Higher concentrations of iodine are associated with the Frasnian carbonate-terrigenous complex (I: 9,89 µg/l; Se: 0,09 µg/l), while lower concentrations are associated with the Famennian carbonate complex (I: 3,83 µg/l; Se: 0,2 µg/l). Concentrations were found to be below the optimum in 67% of groundwater samples for iodine (10 µg/l), and in 99% for selenium (2,5 µg/l). A notable variation in iodine and selenium levels was observed between the districts with low and high TC risk in the region. Based on the data obtained, it is possible to estimate the environmental impact on the TC morbidity.

Keywords: biogeochemistry, geochemical ecology, trace elements, endemic diseases, drinking water, pasture soils

Acknowledgements. The work was carried out under the state task of the V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS. The authors are grateful to A.S. Kostin and M.L. Golovin for their assistance in sample preparation and chemical analysis.

REFERENCES

- Arthur J.R., Beckett G.J. Symposium 2 Newer aspects of micronutrients in at risk groups: New metabolic roles for selenium, *Proc. Nutr. Soc.*, 1994, vol. 53, no. 3, p. 615–624, DOI: 10.1079/PNS19940070.
- Atlas of Caesium 137 deposition on Europe after the Chernobyl accident*, M. De Cort (ed.). Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998, 63 p.
- Bogović Crnčić T. Risk Factors for Thyroid Cancer: What Do We Know So Far? *Acta clinica Croatica*, 2020, no. 59, p. 66–72, DOI: 10.20471/acc.2020.59.s1.08.
- Bonnefond S., Davies T.F. Thyroid Cancer – Risks and Causes, *Oncology & Hematology Review* (US), 2014, vol. 10, no. 02, p. 144, DOI: 10.17925/OHR.2014.10.2.144.
- Boyev V.A. Selen v pochvakh i sel'skokhozyaistvennykh kul'turakh yuga Tyumenskoi oblasti [Selenium in the soils and agricultural plants in the south of Tyumen region], *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Ekologiya*, 2013, no. 12, p. 112–120. (In Russian)
- Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V. et al. Risk of Thyroid Cancer After Exposure to ¹³¹I in Childhood // *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 724–732, DOI: 10.1093/jnci/dji129.
- Choi W.J., Kim J. Dietary Factors and the Risk of Thyroid Cancer: A Review, *Clin Nutr Res.*, 2014, vol. 3, no. 2, p. 75, DOI: 10.7762/cnr.2014.3.2.75.
- Dannye po radioaktivnomu zagrizneniju territorii naselennykh punktov Rossijskoj Federacii ceziem – 137, stronciem – 90 i plutoniem – 239+240* [The data on radioactive contamination of the territory of the settlements of the Russian Federation by caesium – 137, strontium – 90 and plutonium – 239+240], S.M. Valkylovsky (ed.), Obninsk, Typhoon Publ., 2022, 233 p. (In Russian)
- Drozd V.M. et al. Major Factors Affecting Incidence of Childhood Thyroid Cancer in Belarus after the Chernobyl Accident: Do Nitrates in Drinking Water Play a Role? *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 9, e0137226, DOI: 10.1371/journal.pone.0137226.
- Gerasimov G., Judenitch O., Dedov I. Iodine Deficiency Disorders and Endemic Goiter in the Commonwealth of Independent States (CIS), *Iodine Deficiency in Europe: A Continuing Concern* NATO ASI Series, F. Delange, J.T. Dunn, D. Glinioer (eds.), Boston, MA, Springer US, 1993, p. 347–351, DOI: 10.1007/978-1-4899-1245-9_43.
- Global Scorecard of Iodine. Nutrition in 2020 in the General Population Based on School-Age Children (SAC)*, IGN, Ottawa, 2021, p. 15.
- GOST 26213-2021 Pochvy, Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* [State Standart 26213-2021 Soils, Methods for determination of organic matter], Official publication, Moscow, FGBU RST, 2021, 11 p. (In Russian)
- GOST R 59024-2020 Voda, Obshhie trebovaniya k otboru prob* (Izдание s Izmeneniyem no 1). [State Standart R 59024-2020 Water, General requirements for sampling (Edition with Amendment No. 1), Official publication. Moscow, FGBU RST, 2023, 40 p. (In Russian)]
- Hanley J.P., Jackson E., Morrissey L.A. et al. Geospatial and Temporal Analysis of Thyroid Cancer Incidence in a Rural Population, *Thyroid*, 2015, vol. 25, no. 7, p. 812–822.
- International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 4th edition, Vienna, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 236 p.
- Ivanov A.V., Shoba S.A. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0], Tula, Grif and K Publ., 2014, 768 p. (In Russian)
- Ivanov V.K., Tsyb A.F., Maksyutov M.A. et al. Osnovnye rezul'taty radiacionno-epidemiologicheskogo analiza dannyh RGMDR (k 20-letiju Chernobylja) [Basic results of the radiation-epidemiological analysis of the RGMDR data (on the 20th anniversary of Chernobyl accident)], *Radiacija i risk (Bjulleten' Nacional'nogo radiacionno-epidemiologicheskogo registra)*, 2005, no. S3, p. 6–111. (In Russian)
- Jang J., Yoo D.-S., Chun B.C. Spatial distribution and determinants of thyroid cancer incidence from 1999 to 2013 in Korea, *Sci Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 22474, DOI: 10.1038/s41598-021-00429-w.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Russian soil classification and diagnostics], L.L. Shishov et al. Smolensk, Oikumena Publ., 2004, 341 p. (In Russian)
- Kolmykova L.I. *Osobennosti vodnoi migratsii ioda i seleny v geokhimicheski kontrastnykh landshaftakh Bryanskoi oblasti* [Specific features of water migration of iodine and selenium in geochemically contrasting landscapes of the Bryansk oblast], Ph.D. Thesis in Geosciences, Moscow, Institut geokhimii i analiticheskoi khimii Rossijskoi akademii nauk, 2017, 179 p. (In Russian)
- Kolmykova L.I., Korobova E.M. Iodine and selenium in natural waters as a risk factor in manifestation of endemic thyroid diseases (review), *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 2, p. 5–13, DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-005-013.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Bech J. Cartographic evaluation of the risk of natural elements' deficiency in the soil cover provoking spatial variation of the endemic morbidity level (on example of thyroid morbidity among population of the Central Federal District, Russia), *Environ Geochem Health*, 2024, vol. 46, no. 3, art. 109, DOI: 10.1007/s10653-024-01912-9.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kolmykova L.I. Theoretical and Methodological Approaches to the Analysis of the Spatial Distribution of Endemic Diseases of Geochemical Nature, *Geochem. Int.*, 2023, vol. 61, no. 10, p. 1074–1086, DOI: 10.1134/S0016702923100063.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kurnosova I.V., Silenok A.V. Spatial geochemical differentiation of the iodine-

- induced health risk and distribution of thyroid cancer among urban and rural population of the Central Russian plain affected by the Chernobyl NPP accident, *Environ Geochem Health*, 2022, vol. 44, no. 6, p. 1875–1891, DOI: 10.1007/s10653-021-01133-4.
- Kovalsky V.V. Biologicheskaya rol' ioda [Biological role of iodine], *Nauchn. tr. VASKhNIL*, 1972, p. 3–32. (In Russian)
- Kovalsky V.V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology], Moscow, 1974, 282 p. (In Russian)
- Kovalsky V.V., Andrianova G.A. *Mikrojelementy v pochvah SSSR* [Micronutrients in the soils of the USSR], Moscow, Nauka Publ., 1970, 180 p. (In Russian)
- Lossow K., Renko K., Schwarz M. et al. The Nutritional Supply of Iodine and Selenium Affects Thyroid Hormone Axis Related Endpoints in Mice, *Nutrients*, 2021, vol. 13, no. 11, p. 3773, DOI: 10.3390/nu13113773.
- Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, no. 1, p. 50–60, DOI: 10.1214/aoms/1177730491.
- MUK 4.1.033-95 *Metody kontrolya. Khimicheskie faktory. Opredelenie selena v produktakh pitaniya* [Methodological guidelines 4.1.033-95. Control methods. Chemical factors. Determination of selenium in foodstuffs], Moscow, Informatsionno-izdatel'skii tsentr Goskomsanepidnadzora Rossii Publ., 1995, 5 p. (In Russian)
- Nikitina L.P., Ivanov V.N., Anikina L.V. [Selenium in rocks and soils], *Selen v zhizni cheloveka i zivotnykh* [Selenium in the life of humans and animals], Moscow, VINITI RAN Publ., 1995, p. 17–19. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote po teme: *Razrabotka i prakticheskaya realizatsiya biologizirovannykh sistem zemledeliya, obespechivayushchikh ushchestvennoe snizhenie energo- i resursozatrata i ekologostabiliziruyushchii effekt v agroekosistemakh (zaklyuchitel'nyi)* [Report on the research on the topic: Development and practical implementation of biological farming systems providing for a significant reduction in energy and resource costs and an ecologically stabilizing effect in agroecosystems (final)], N.V. Parakhin (ed.), Oryol, Orlovskii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet Publ., 2013, 225 p. (In Russian).
- Otchet o rezul'tatakh rabot po ob"ektu "Sostavlenie kart raionirovaniya territorii TsFO masshtaba 1:500 000 (s vrezkami masshtaba 1:200 000) dlya optimizatsii proizvodstva regional'nykh gidrogeologicheskikh, inzhenerno-geologicheskikh i geoekologicheskikh rabot v period 2005–2010 godov" v 2-kh tomakh [Report on the results of work on the object "Compilation of maps of zoning of the territory of the Central Federal District at the scale of 1:500 000 (with inserts at the scale of 1:200 000) for optimisation of regional hydrogeological, engineering-geological and geoecological works during 2005–2010", in 2 volumes] G.V. Lyashchenko, V.V. Kurennoi (eds.), Moscow, Geotsentr-Moskva Publ., 2007, vol. 1, 106 p. (In Russian)
- Otchet po teme "Sostavlenie kompleksa gidrogeologicheskikh kart masshtaba 1:500000 territorii deyatel'nosti Tsentral'nogo RGTs", v 5 t., t. 1, kn. 9, Poyasnitel'naya zapiska k gidrogeologicheskim kartam "Vodonosnye gorizonty kainozoiskikh otlozhenii" i "Vody mezozoiskikh, paleozoiskikh i dokembriiskikh otlozhenii", masshtab 1:500 000, Orlovskaya oblast' [Report on the theme 'Compilation of a set of hydrogeological maps at a scale of 1:500 000 of the Central RGC activity area', in 5 vols, t. 1, book 9, Explanatory note to hydrogeological maps 'Aquifers of Cenozoic sediments' and 'Waters of Mesozoic, Paleozoic and Precambrian sediments'], N.S. Viktorova (ed.), Moscow, Mezhhregional'nyi tsentr po geologicheskoi kartografii, Geokart Publ., 2001, 28 p.
- Proskuryakova G.F., Nikitina O.N. Uskorennyi variant kineticheskogo rodanidno-nitritnogo metoda opredeleniya mikrokolichestv ioda v biologicheskikh ob'ektakh [The accelerated variant of the kinetic rhodanide-nitrite method for determination of trace quantities of iodine in biological objects], *Agrokhiimiya*, 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, *International journal of epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4, p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205.
- Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 1965, vol. 52, no. 3–4, p. 591–611, DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.
- Simonova V.G. Analysis of the incidence of thyroid cancer in the population of the Oryol Region, *Sanitary Doctor*, 2022, no. 2, p. 132–141, DOI: 10.33920/med-08-2202-05.
- Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Gur'ev N.E. Geokhimicheskaya otsenka soderzhaniya selena v osnovnykh tipakh pochv Tyumenskoi oblasti [Geochemical assessment of selenium content in the main soil types of the Tyumen Oblast], *Problemy regional'noi ekologii*, 2021, no. 3, p. 32–38. (In Russian)
- Stepanenko V., Kondrashov A., Yaskova E. et al. The reconstruction of thyroid dose following Chernobyl, *The radiological consequences of the Chernobyl accident*, 1996, p. 7–12.
- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, CA, *A Cancer J. Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, p. 209–249, DOI: 10.3322/caac.21660.
- Turetskaya E.S., Danileichenko V.A. [Iodine, bromine, cobalt and copper in drinking water of a mountainous area and endemic disease], *Mikroelementy v zhitovodstve i meditsine* [Trace elements in cattle breeding and medicine], Kiev, Zdorov'e Publ., 1965, p. 62–67. (In Russian)
- Zabolevaemost' vsego naseleniya Rossii v 2017 godu. *Statisticheskie materialy* [Morbidity of the total population of Russia in 2017. Statistical materials], Moscow, Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut organizatsii i informatizatsii zdoravookhraneniya Minzdrava Rossii Publ., 2018, 140 p. (In Russian)
- Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii v 2021 godu (zabolevaemost' i smertnost') [Malignant neoplasms in Russia in 2021 (morbidity and mortality)], A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shakhzodova (eds.), Moscow, P.A. Herzen Publ., 2022, 252 p. (In Russian)
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V. et al. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 1, p. 8–15, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.

Web sources

Global Cancer Observatory: Cancer Today, URL: <https://gco.iarc.who.int/today> (access date 17.07.2024).

SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic norms and requirements 1.2.3685-21 Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness of envi-

ronmental factors for humans], Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru Publ., 2021, no 0001202102030022 (access date 06.12.2024). (In Russian)

Vyborochnoe nablyudenie ratsiona pitaniya naseleniya 2013 [Selective observation of the population's dietary intake 2013], URL: https://rosstat.gov.ru/free_doc/new_site/food1/survey0/index.html (access date 17.07.2024). (In Russian)

Received 22.08.2024

Revised 05.10.2024

Accepted 26.11.2024