



## Оценка воздействия на здоровье населения Мурманской области тяжелых металлов, содержащихся в ягодах дикорастущих кустарничков

В.Н. Федоров<sup>1</sup>, А.Н. Кизеев<sup>1</sup>, Ю.А. Новикова<sup>1</sup>, Н.А. Тихонова<sup>1</sup>, А.А. Ковшов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 2-я Советская ул., д. 4, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова» Минздрава России, ул. Кирочная, д. 41, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация

### Резюме

**Введение.** Исследования ягод дикорастущих кустарничков, проводившиеся в Мурманской области, показали повышенное накопление ряда тяжелых металлов, особенно вблизи комбината «Североникель». Отмечалось существенное накопление поллютантов в чернике, бруснике и воронике.

**Цель исследования** заключалась в оценке воздействия на здоровье населения Мурманской области содержащихся в ягодах дикорастущих кустарничков никеля и меди.

**Материалы и методы.** Объектом исследований послужили ягоды черники, брусники и вороники. Оценка риска здоровью населения проводилась в соответствии с Руководством Р 2.1.10.1920-04. Отбор растительных образцов проводился в августе – сентябре 2016–2018 гг. на 10 стационарных мониторинговых площадках, расположенных вдоль градиента промышленного загрязнения по розе ветров в меридиональном (южном) направлении от комбината «Североникель».

**Результаты.** Значения канцерогенного риска, обусловленного поступлением никеля из исследованных ягод, характеризуются как неприемлемо высокие (более 1,0Е-03) применительно ко всем мониторинговым площадкам. Расчетные значения хронического неканцерогенного риска от воздействия никеля также характеризуются неприемлемо высокими значениями. Значения хронического неканцерогенного риска от воздействия меди характеризуются как неприемлемо высокие лишь от употребления вороники. Значения индекса неканцерогенной опасности при одностороннем действии меди и никеля на органы пищеварительной системы и печень характеризуются как неприемлемо высокие (более 1,0) применительно к большинству мониторинговых площадок для ягод всех изучаемых растений.

**Обсуждение.** Высокие значения риска для здоровья населения диктуют необходимость разработки гигиенических рекомендаций по их снижению: ограничение потребления ягод на уровне не более 6 кг в год, отказ от сбора ягод, произрастающих на расстоянии менее 15 км от комбината «Североникель» и др.

**Выводы.** Прогнозируемые уровни канцерогенного и неканцерогенного рисков, обусловленные воздействием никеля и меди, оцениваются как неприемлемо высокие, что свидетельствует о выраженном индустриальном воздействии на бореальные экосистемы в зоне влияния предприятия, распространяющегося более чем на 15 км от его промышленной площадки. Необходимо разработка гигиенических рекомендаций для населения, употребляющего в пищу собираемые в зоне влияния комбината «Североникель» дикорастущие ягоды черники, брусники и вороники.

**Ключевые слова:** Мурманская область, ягоды, дикорастущие кустарнички, никель, медь, оценка риска, здоровье населения.

**Для цитирования:** Федоров В.Н., Кизеев А.Н., Новикова Ю.А., Тихонова Н.А., Ковшов А.А. Оценка воздействия на здоровье населения Мурманской области тяжелых металлов, содержащихся в ягодах дикорастущих кустарничков // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30. № 5. С. 41–50. doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-41-50>

### Сведения об авторах:

**Федоров Владимир Николаевич** – старший научный сотрудник отдела исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: [vf1986@mail.ru](mailto:vf1986@mail.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1378-1232>.

**Кизеев Алексей Николаевич** – к.б.н., старший научный сотрудник отдела исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: [aleksei.kizeev@mail.ru](mailto:aleksei.kizeev@mail.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-7327>.

✉ **Новикова Юлия Александровна** – старший научный сотрудник, и. о. руководителя отдела исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: [j.novikova@s-znc.ru](mailto:j.novikova@s-znc.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4752-2036>.

**Тихонова Надежда Андреевна** – младший научный сотрудник отдела исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: [n.tikhonova@s-znc.ru](mailto:n.tikhonova@s-znc.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-4009>.

**Ковшов Александр Александрович** – к.м.н., старший научный сотрудник отдела исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; ассистент кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Минздрава России; e-mail: [a.kovshov@s-znc.ru](mailto:a.kovshov@s-znc.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-8431>.

**Информация о вкладе авторов:** концепция и дизайн исследования: Федоров В.Н.; сбор данных: Кизеев А.Н.; анализ и интерпретация результатов: Федоров В.Н., Ковшов А.А.; обзор литературы: Кизеев А.Н.; подготовка рукописи: Федоров В.Н., Кизеев А.Н., Новикова Ю.А., Тихонова Н.А. Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Соблюдение этических стандартов:** данное исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Финансирование:** исследование проведено без спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 14.03.22 / Принята к публикации: 21.04.22 / Опубликовано: 31.05.22

## Assessment of Health Impact of Heavy Metals Contained in Wild Berries of Shrubs for the Population of the Murmansk Region

Vladimir N. Fedorov,<sup>1</sup> Aleksei N. Kizeev,<sup>1</sup> Yuliya A. Novikova,<sup>1</sup>  
Nadezhda A. Tikhonova,<sup>1</sup> Aleksandr A. Kovshov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> North-West Public Health Research Center 4, 2<sup>nd</sup> Sovetskaya Street, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

<sup>2</sup> North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 41 Kirochnaya Street, Saint Petersburg, 195067, Russian Federation

### Summary

**Background:** Studies of wild berries of local shrubs carried out in the Murmansk Region showed an increased accumulation of heavy metals in them, especially near the Severonickel plant. High concentrations of industrial pollutants were measured in blueberries, lingonberries and crowberries.

**Objective:** To assess health effects of population exposure to nickel and copper in wild berries of small shrubs in the Murmansk Region.

**Materials and methods:** We tested metal contents in blueberries, lingonberries and crowberries gathered in August–September of 2016–2018 at ten stationary monitoring plots located along the industrial pollution gradient in the meridional (south) direction on the leeward side of the Severonickel plant. Health risk assessment was conducted in accordance with Guidelines R 2.1.10.1920-04, Health Risk Assessment from Environmental Chemicals.

**Results:** Values of carcinogenic risk from oral exposure to nickel contained in the berries were unacceptably high ( $> 1.0E-03$ ) at all monitoring plots. Estimates of chronic non-carcinogenic risk from nickel exposure were also high while those from copper exposure were unacceptable only for crowberry. Hazard index values for the unidirectional effect of copper and nickel on the digestive tract and liver were unacceptably high ( $> 1.0$ ) at most monitoring plots for all the berries studied.

**Discussion:** High risk values for the local population necessitate the development of recommendations for exposure reduction, such as limiting the annual consumption of berries to 6 kg, avoiding berry picking at a distance of up to 15 km from the Severonickel plant, etc.

**Conclusions:** The predicted levels of carcinogenic and non-carcinogenic risks associated with exposure to nickel and copper were estimated as unacceptably high, thus indicating a pronounced industrial impact on boreal ecosystems in the zone of influence of the enterprise, extending more than 15 km from its industrial site. It is critical to develop appropriate recommendations for the population consuming wild-growing blueberries, cowberries and crowberries picked in this industrially contaminated area.

**Keywords:** Murmansk Region, wild berries, shrubs, nickel, copper, risk assessment, public health.

**For citation:** Fedorov VN, Kizeev AN, Novikova YuA, Tikhonova NA, Kovshov AA. Assessment of health impact of heavy metals contained in wild berries of shrubs for the population of the Murmansk Region. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(5):41–50. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-41-50>

#### Author information:

Vladimir N. Fedorov, Senior Researcher, Arctic Environmental Health Department, North-West Public Health Research Center; e-mail: vf1986@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1378-1232>.

Aleksei N. Kizeev, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Arctic Environmental Health Department, North-West Public Health Research Center; e-mail: aleksei.kizeev@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-7327>.

Yuliya A. Novikova, Senior Researcher, Acting Head, Arctic Environmental Health Department, North-West Public Health Research Center; e-mail: j.novikova@s-znc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4752-2036>.

Nadezhda A. Tikhonova, Junior Researcher, Arctic Environmental Health Department, North-West Public Health Research Center; e-mail: n.tikhonova@s-znc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-4009>.

Aleksandr A. Kovshov, Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Arctic Environmental Health Department, North-West Public Health Research Center; Assistant Professor, Department for Hygiene of Educational, Training, and Labor Conditions, and Radiation Hygiene, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; e-mail: a.kovshov@s-znc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-8431>.

**Author contributions:** study conception and design: Fedorov V.N.; data collection: Kizeev A.N.; analysis and interpretation of results: Fedorov V.N., Kovshov A.A.; literature review: Kizeev A.N.; draft manuscript preparation: Fedorov V.N., Kizeev A.N., Novikova Yu.A., Tikhonova N.A. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

**Compliance with ethical standards:** Ethics approval was not required for this work.

**Funding:** The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: March 14, 2022 / Accepted: April 21, 2022 / Published: May 31, 2022

**Введение.** Дикорастущие ягодные кустарнички — доминанты нижних ярусов бореальных лесных экосистем. Они характеризуются высокой экологической пластичностью и способностью сохранять свои жизненные свойства, включая плодоношение, в непосредственной близости от промышленных предприятий<sup>1</sup>. Для жителей районов Крайнего Севера плоды дикорастущих кустарничков являются традиционным фактором питания [1] и пользуются большой популярностью.

На территории Мурманской области одним из наиболее мощных источников негативного антропогенного воздействия на окружающую среду и на среду обитания человека является дочернее предприятие ПАО «ГМК Норильский никель» АО «Кольская горно-металлургическая компания» (АО КГМК) — ведущий производственный комплекс региона, занимающийся горно-металлургическим производством по добыче и переработке сульфидных медно-никелевых руд и выплавке цветных металлов<sup>2</sup>. Начиная с 30–40-х годов прошлого века АО КГМК является источником выбросов, содержащих сернистый ангидрид, мелкодисперсные смеси сульфидов металлов, оксиды никеля и меди<sup>3</sup> [2–4]. Промплощадка ведущего предприятия АО КГМК — медно-никелевого

комбината «Североникель» — находится в центральной части региона и является градообразующим для г. Мончегорска. Непосредственно после своей постройки комбинат перерабатывал местные сульфидные медно-никелевые руды со средним содержанием серы менее 1,2 %. С 1946 года в переработку, помимо местных, были вовлечены руды Печенгского месторождения со средним содержанием серы 6,5 %, с 1969 года — норильские руды с очень высоким содержанием серы до 30 % и с большим содержанием тяжелых металлов, чем местное сырье, вследствие чего уровень выбросов в атмосферный воздух существенно увеличился [5]. В результате интенсивного аэротехногенного загрязнения в окрестностях комбината образовались обширные зоны деградации почвенно-растительного покрова: от угнетения лишайников до полного разрушения почв и образования техногенных пустошей [6–8].

Проведенные в конце 80-х годов прошлого века исследования ягод дикорастущих кустарничков [9] показали повышенное накопление ряда тяжелых металлов, преимущественно вблизи комбината «Североникель». Сокращение производства и модернизация технологического оборудования, произошедшие в течение последних десятилетий,

<sup>1</sup> Ефимова М.А. Биоморфологические особенности *Vaccinium myrtillus* L. и *Vaccinium vitis-idaea* L. в естественных и антропогенно нарушенных лесных сообществах Кольского полуострова: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2007. 22 с.

<sup>2</sup> Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 году. Мурманск, 2021. 176 с.

<sup>3</sup> Кимстач В.А., Чашин В.П., Абрютин Л.И. и др. Стойкие токсичные вещества, безопасность питания и коренные народы российского Севера: Резюме заключительного отчета; Arctic Monitoring and Assessment Programme. Осло—Москва: Полярный фонд, 2004. 80 с.

способствовали снижению объемов поступления в окружающую среду загрязняющих веществ [10]. Однако, несмотря на улучшение экологической обстановки в районе расположения комбината, многими исследователями в период с 2004 по 2013 г. отмечалось существенное накопление поллютантов в наземных компонентах, в том числе и таких доминирующих на территории региона ягод, как черника обыкновенная (или черника миртолистная), брусника и вороника [10–16], что делает их малопривлекательными для использования в качестве продовольственного и лекарственного сырья. Однако сведений, связанных с оценкой воздействия на здоровье населения региона содержащихся в ягодах дикорастущих кустарничков тяжелых металлов при возможном употреблении их в пищу, крайне мало [17].

Цель настоящего исследования заключалась в оценке воздействия на здоровье населения Мурманской области содержащихся в ягодах дикорастущих кустарничков никеля и меди.

**Материалы и методы.** Объектом исследований послужили ягоды кустарничков родов *Vaccinium* и *Empetrum* – черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и вороники (*Empetrum hermaphroditum* Lange ex Nagerup). Для оценки воздействия на здоровье населения никеля и меди, содержащихся в ягодах данных видов растений, использовалась методология оценки риска для здоровья населения в соответствии с действующим Руководством<sup>4</sup>.

В рамках настоящего исследования рассматривался приближенный к реалистичному сценарий, при котором среднестатистический житель Мурманской области предположительно съедает около 100 г ягод 1 раз в 3 дня в течение года, или 12,2 кг в год.

Общая формула для расчета величины поступления химического вещества в организм человека имеет следующий вид:

$$LADD = \frac{C \cdot CR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (1)$$

где:  $LADD$  – среднесуточное пожизненное поступление вещества, мг/кг массы тела в день;

$C$  – концентрация химического вещества, мг/кг продукта;

$CR$  – количество продукта, поступающего в сутки в организм человека, кг;

$EF$  – частота воздействий, число дней/год;

$ED$  – продолжительность воздействия, число лет;

$BW$  – масса тела: средняя масса тела в период экспозиции, кг;

$AT$  – время осреднения; период осреднения экспозиции, число дней.

Вышеприведенные коэффициенты в данном исследовании были приняты равными следующим числовым величинам:  $CR - 0,1$  кг;  $EF - 122$  дня в году;  $ED - 70$  лет;  $BW - 70$  кг;  $AT - 365$  дней.

При оценке риска моделировались два сценария воздействия: канцерогенное (никель) и неканцерогенное (никель, медь).

Для расчета значений канцерогенного риска  $CR$  использовалась формула (2):

$$CR = LADD \cdot SF_0, \quad (2)$$

где:  $LADD$  – среднесуточное пожизненное поступление вещества, мг/кг массы тела в день;

$SFo$  – фактор наклона (фактор канцерогенного потенциала) при пероральном поступлении,  $(\text{мг}/(\text{кг} \times \text{день}))^{-1}$ .

Для расчета значений неканцерогенного риска (коэффициента опасности НQ) использовалась формула (3):

$$HQ = LADD/RfD, \quad (3)$$

где:  $LADD$  – среднесуточное пожизненное поступление вещества, мг/кг массы тела в день;

*RfD* – референтная доза, мг/кг массы тела.

В соответствии с Руководством<sup>4</sup> значение SFO для никеля было принято равным  $0,84 \text{ (мг/(кг} \times \text{сут.))}^{-1}$ , значения RfD для никеля –  $0,02 \text{ мг/кг}$ , меди –  $0,019 \text{ мг/кг}$ .

В качестве критериев приемлемости риска рассматривались диапазоны значений:

— для канцерогенного риска — не более 1,0E-04;

– для неканцерогенного риска (коэффициенты опасности HQ и индекса опасности HI при одностороннем действии 2 и более веществ на отдельные органы и системы) – не более 1,0.

Исходными данными для расчета риска здоровью населения послужили результаты собственных исследований, полученные на основании сбора растительного материала (ягод) в течение осенних периодов (август – сентябрь) 2016–2018 годов.

Отбор растительных образцов проводился на 10 стационарных мониторинговых площадках, расположенных вдоль градиента промышленного загрязнения по розе ветров в меридиальном (южном) направлении от комбината «Североникель».

Географические координаты площадок и расстояние от источника промышленных выбросов приведены в табл. 1.

Растительный покров на площадках соответствовал различным стадиям состояния по степени нарушенности экосистем<sup>5</sup>: от сильно нарушенных (расположенных на расстояниях от 1 до 7 км от источника выбросов – площадки № 1–3) до средне- (от 12 до 20 км – площадки № 4–6) и слабонарушенных (от 25 до 48 км – площадки № 7–9), а также условно фоновых (более 60 км – площадка № 10) биогеоценозов. Травяно-кустарниковый покров на точках мониторинга включал в себя дикорастущие кустарнички черники, брусники и вороники в количестве, достаточном для сбора их плодов с целью последующего химического анализа.

Отбор растительных образцов и пробоподготовка для определения содержания металлов в ягодах дикорастущих кустарничков проводились в соответствии с общепринятыми требованиями [18]. В лаборатории ягоды сушили до воздушно-сухого состояния и хранили в закрытых полиэтиленовых емкостях до начала анализа. Измерение концентраций тяжелых металлов (никеля и меди) в растительных образцах определяли методом атомной абсорбции в Геологическом институте Кольского научного центра РАН. Для обработки результатов исследований использовалось программное обеспечение Microsoft Excel 2016 и программа ArcGIS.

<sup>4</sup> Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

<sup>5</sup> Говорова А.Ф. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Кольском полуострове (на примере комбината «Североникель»): Автореферат дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 28 с.

**Результаты.** Результаты количественного химического анализа образцов ягод дикорастущих кустарничков приведены в табл. 2–3. Расчеты риска выполнялись от употребления ягод с каждой мониторинговой площадки отдельно, что позволило охарактеризовать их с позиции приемлемого риска для здоровья населения региона.

В табл. 2 и 3 представлены расчетные значения суточных доз поступления никеля и меди при рассматриваемом сценарии употребления ягод в пищу, а также значения канцерогенного (от воздействия никеля) и неканцерогенного (от воздействия меди и никеля) рисков. Как можно видеть из табл. 2, значения канцерогенного риска, обусловленного поступлением никеля из исследованных ягод, характеризуются как неприемлемо высокие – более  $1,0 \times 10^{-3}$  – применительно ко всем мониторинговым площадкам. В соответствии с Руководством<sup>3</sup> и рекомендациями Всемирной организации здравоохранения данный уровень риска характеризуется как неприемлемо высокий как для населения, так и для отдельных профессиональных групп. Наблюдаемые неприемлемо высокие уровни риска характерны для всех исследуемых образцов ягод, отобранных на всех мониторинговых площадках (в том числе наиболее удаленной от источника промышленных выбросов, условно фоновой площадке № 10), что

свидетельствует о ярко выраженном загрязнении растительного покрова соединениями никеля. Применительно к рассматриваемой ситуации можно рекомендовать ограничение уровня потребления ягод населением в пределах изучаемой территории Мурманской области на уровне не более 0,5 кг в год.

Расчетные значения хронического неканцерогенного риска от воздействия никеля (табл. 2) характеризуются неприемлемо высокими значениями применительно к употреблению ягод, собранных с площадок № 1–5. При этом значения хронического неканцерогенного риска при употреблении вороники характеризуются как неприемлемо высокие лишь от воздействия меди, в том числе применительно к площадкам № 1–8. Наблюдаемое явление, по всей видимости, обусловлено большим содержанием меди в пробах вороники в сравнении с другими рассматриваемыми ягодами дикорастущих кустарничков (табл. 3).

Учитывая имеющиеся сведения об одностороннем действии никеля и меди на органы пищеварительной системы и печень, была проведена суммация ожидающихся значений риска (коэффициентов опасности HQ) от воздействия указанных веществ с получением величин индексов опасности HI. Расчетные значения индексов опасности HI приведены в табл. 4.

**Таблица 1.** Координаты мониторинговых площадок и расстояние от источника выбросов

**Table 1.** Coordinates of monitoring plots and the distance from the source of emissions

| Мониторинговая площадка /<br>Monitoring plots | Координаты / Coordinates |          | Расстояние от источника выбросов, км /<br>Distance from the emission source, km |
|-----------------------------------------------|--------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                               | x                        | y        |                                                                                 |
| 1                                             | 32,80256                 | 67,88737 | 1                                                                               |
| 2                                             | 32,77756                 | 67,85391 | 5                                                                               |
| 3                                             | 32,79663                 | 67,83804 | 7                                                                               |
| 4                                             | 32,78588                 | 67,80345 | 12                                                                              |
| 5                                             | 32,78057                 | 67,77368 | 15                                                                              |
| 6                                             | 32,80401                 | 67,73448 | 20                                                                              |
| 7                                             | 32,83790                 | 67,70196 | 25                                                                              |
| 8                                             | 32,82282                 | 67,64995 | 30                                                                              |
| 9                                             | 32,19223                 | 67,32515 | 48                                                                              |
| 10                                            | 32,26016                 | 67,22837 | 65                                                                              |

**Таблица 2.** Расчетные значения суточной дозы при пожизненном поступлении никеля и значения канцерогенного риска, обусловленного его поступлением

**Table 2.** Estimated values of the daily dose for the lifetime nickel exposure and related carcinogenic risk (CR)

| Мониторинговая площадка /<br>Monitoring plots | Содержание Ni, мг/кг /<br>Ni content, mg/kg |                           |                         | LADD никеля, мг/кг массы тела в сутки /<br>Nickel LADD, mg/kg body weight per day |                           |                         | CR (Ni)                  |                           |                         | HQ (Ni)                  |                           |                         |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                                               | Черника /<br>Blueberries                    | Брусника /<br>Lingonberry | Вороника /<br>Crowberry | Черника /<br>Blueberries                                                          | Брусника /<br>Lingonberry | Вороника /<br>Crowberry | Черника /<br>Blueberries | Брусника /<br>Lingonberry | Вороника /<br>Crowberry | Черника /<br>Blueberries | Брусника /<br>Lingonberry | Вороника /<br>Crowberry |
| 1                                             | н/д*                                        | н/д                       | 2,52                    | н/д                                                                               | н/д                       | 0,0842                  | н/д                      | н/д                       | 7,08E-02                | н/д                      | н/д                       | 4,21E+00                |
| 2                                             | 2,23                                        | 2,81                      | н/д                     | 0,0745                                                                            | 0,0939                    | н/д                     | 6,26E-02                 | 7,89E-02                  | н/д                     | 3,73E+00                 | 4,70E+00                  | н/д                     |
| 3                                             | 1,85                                        | 1,84                      | 1,85                    | 0,0618                                                                            | 0,0615                    | 0,0618                  | 5,19E-02                 | 5,17E-02                  | 5,19E-02                | 3,09E+00                 | 3,08E+00                  | 3,09E+00                |
| 4                                             | 1,48                                        | 1,95                      | 1,18                    | 0,0495                                                                            | 0,0652                    | 0,0394                  | 4,16E-02                 | 5,47E-02                  | 3,31E-02                | 2,47E+00                 | 3,26E+00                  | 1,97E+00                |
| 5                                             | 0,85                                        | 0,58                      | 0,55                    | 0,0284                                                                            | 0,0194                    | 0,0184                  | 2,39E-02                 | 1,63E-02                  | 1,54E-02                | 1,42E+00                 | 9,69E-01                  | 9,19E-01                |
| 6                                             | 0,45                                        | 0,65                      | 0,42                    | 0,0150                                                                            | 0,0217                    | 0,0140                  | 1,26E-02                 | 1,82E-02                  | 1,18E-02                | 7,52E-01                 | 1,09E+00                  | 7,02E-01                |
| 7                                             | 0,48                                        | 0,55                      | 0,11                    | 0,0160                                                                            | 0,0184                    | 0,0037                  | 1,35E-02                 | 1,54E-02                  | 3,09E-03                | 8,02E-01                 | 9,19E-01                  | 1,84E-01                |
| 8                                             | 0,34                                        | 0,37                      | 0,12                    | 0,0114                                                                            | 0,0124                    | 0,0040                  | 9,55E-03                 | 1,04E-02                  | 3,37E-03                | 5,68E-01                 | 6,18E-01                  | 2,01E-01                |
| 9                                             | 0,35                                        | 0,21                      | 0,24                    | 0,0117                                                                            | 0,0070                    | 0,0080                  | 9,83E-03                 | 5,90E-03                  | 6,74E-03                | 5,85E-01                 | 3,51E-01                  | 4,01E-01                |
| 10                                            | 0,25                                        | 0,18                      | 0,15                    | 0,0084                                                                            | 0,0060                    | 0,0050                  | 7,02E-03                 | 5,05E-03                  | 4,21E-03                | 4,18E-01                 | 3,01E-01                  | 2,51E-01                |

**Примечание:** здесь и далее (табл. 2–4) серым цветом выделены неприемлемые уровни риска.

**Note:** In Tables 2–4, unacceptable risk levels are in gray.

Как можно видеть из табл. 4, значения индекса неканцерогенной опасности при однонаправленном действии меди и никеля на органы пищеварительной системы и печень характеризуются как неприемлемо высокие (более 1,0) применительно ко всем мониторинговым площадкам для ягод всех изучаемых растений, за исключением площадок № 9 и 10 (условно фоновая территория).

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют констатировать наличие значительной зоны влияния комбината «Североникель», которая распространяется в южном направлении не менее чем на 20 км от границ предприятия. Об этом свидетельствуют повышенные концентрации меди и никеля, регистрируемые в образцах, отобранных на мониторинговых площадках 1–6.

Различие в уровнях риска от воздействия никеля и меди в зависимости от употребления изученных ягод с учетом каждой из мониторинговых площадок наглядно представлено на рис. 1–6.

Как можно видеть из рис. 1–6, для всех рассматриваемых сценариев поступления никеля и меди неприемлемо высокий неканцерогенный риск прогнозируется на площадках № 2–4. При этом в мониторинговых точках № 5–7 ожидается приемлемый уровень риска (за исключением сценария с воздействием меди при ее поступлении с ягодами вороники), что можно условно характеризовать как границу достижения приемлемого риска.

**Обсуждение.** Несмотря на значительное количество публикаций по изучаемой тематике,

подобное исследование, сопряженное с оценкой риска для здоровья населения, проводится впервые. В исследованиях, посвященных проблеме накопления в растительных тканях техногенных загрязнителей, в частности тяжелых металлов, воздействие на здоровье человека, как правило, либо не рассматривается [9–13], либо требует проведения дополнительных исследований [17]. При этом в ряде работ отечественных [6, 7, 10–12, 14] и зарубежных [4, 12] исследователей показано существенное снижение содержания меди и никеля в компонентах лесных растений с почвенной (ель сибирская, сосна обыкновенная, береза пушистая, черника, брусника, вороника, луговик извилистый) и с атмосферной (лишайники и мохообразные) стратегиями питания по мере увеличения расстояния от источников воздушных промышленных выбросов медно-никелевого производства. Полученные в настоящем исследовании результаты накопления тяжелых металлов в ягодах рассматриваемых дикорастущих кустарничков в целом подтверждают обнаруженные ранее тенденции.

Отсутствие результатов для ягод растений черники и брусники с площадки № 1 и растений вороники для площадки № 2 объясняется значительным повреждением растительного покрова на стадии сильно нарушенных экосистем (от 1 до 5 км) вблизи комбината «Североникель», в связи с чем наблюдалось отсутствие достаточного количества биологического материала, необходимого для осуществления химического анализа.

**Таблица 3.** Расчетные значения суточной дозы при пожизненном поступлении меди и значения неканцерогенного риска (коэффициента опасности HQ), обусловленного ее поступлением

**Table 3.** Estimated values of the daily dose for the lifetime copper exposure and related non-carcinogenic risk (hazard quotient, HQ)

| Мониторинговая площадка / Monitoring plots | Содержание Cu, мг/кг / Cu content, mg/kg |                        |                      | LADD меди, мг/кг массы тела в сутки / LADD of copper, mg/kg body weight per day |                        |                      | HQ (Cu)               |                        |                      |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
|                                            | Черника / Blueberries                    | Брусника / Lingonberry | Вороника / Crowberry | Черника / Blueberries                                                           | Брусника / Lingonberry | Вороника / Crowberry | Черника / Blueberries | Брусника / Lingonberry | Вороника / Crowberry |
| 1                                          | н/д*                                     | н/д                    | 2,14                 | н/д                                                                             | н/д                    | 0,0715               | н/д                   | н/д                    | 3,58E+00             |
| 2                                          | 1,88                                     | 2,63                   | н/д                  | 0,0628                                                                          | 0,0879                 | н/д                  | 3,14E+00              | 4,40E+00               | н/д                  |
| 3                                          | 1,51                                     | 1,62                   | 1,42                 | 0,0505                                                                          | 0,0541                 | 0,0475               | 2,52E+00              | 2,71E+00               | 2,37E+00             |
| 4                                          | 1,22                                     | 1,53                   | 1,15                 | 0,0408                                                                          | 0,0511                 | 0,0384               | 2,04E+00              | 2,56E+00               | 1,92E+00             |
| 5                                          | 0,48                                     | 0,56                   | 0,75                 | 0,0160                                                                          | 0,0187                 | 0,0251               | 8,02E-01              | 9,36E-01               | 1,25E+00             |
| 6                                          | 0,32                                     | 0,53                   | 0,65                 | 0,0107                                                                          | 0,0177                 | 0,0217               | 5,35E-01              | 8,86E-01               | 1,09E+00             |
| 7                                          | 0,39                                     | 0,42                   | 0,51                 | 0,0130                                                                          | 0,0140                 | 0,0170               | 6,52E-01              | 7,02E-01               | 8,52E-01             |
| 8                                          | 0,35                                     | 0,45                   | 0,6                  | 0,0117                                                                          | 0,0150                 | 0,0201               | 5,85E-01              | 7,52E-01               | 1,00E+00             |
| 9                                          | 0,45                                     | 0,45                   | 0,22                 | 0,0150                                                                          | 0,0150                 | 0,0074               | 7,52E-01              | 7,52E-01               | 3,68E-01             |
| 10                                         | 0,32                                     | 0,33                   | 0,21                 | 0,0107                                                                          | 0,0110                 | 0,0070               | 5,35E-01              | 5,52E-01               | 3,51E-01             |

**Таблица 4.** Расчетные значения индексов опасности HI для органов пищеварительной системы и печени

**Table 4.** Estimated values hazard indices (HI) for the digestive system and liver

| Мониторинговая площадка / Monitoring plots | HI (органы пищеварительной системы, печень) от комбинированного воздействия никеля и меди / HI (digestive tract, liver) for the combined effect of nickel and copper |                        |                      |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|
|                                            | Черника / Blueberries                                                                                                                                                | Брусника / Lingonberry | Вороника / Crowberry |
| 1                                          | н/д*                                                                                                                                                                 | н/д                    | 7,79E+00             |
| 2                                          | 6,87E+00                                                                                                                                                             | 9,09E+00               | н/д                  |
| 3                                          | 5,62E+00                                                                                                                                                             | 5,78E+00               | 5,46E+00             |
| 4                                          | 4,51E+00                                                                                                                                                             | 5,82E+00               | 3,89E+00             |
| 5                                          | 2,22E+00                                                                                                                                                             | 1,91E+00               | 2,17E+00             |
| 6                                          | 1,29E+00                                                                                                                                                             | 1,97E+00               | 1,79E+00             |
| 7                                          | 1,45E+00                                                                                                                                                             | 1,62E+00               | 1,04E+00             |
| 8                                          | 1,15E+00                                                                                                                                                             | 1,37E+00               | 1,20E+00             |
| 9                                          | 1,34E+00                                                                                                                                                             | 1,10E+00               | 7,69E-01             |
| 10                                         | 9,53E-01                                                                                                                                                             | 8,52E-01               | 6,02E-01             |

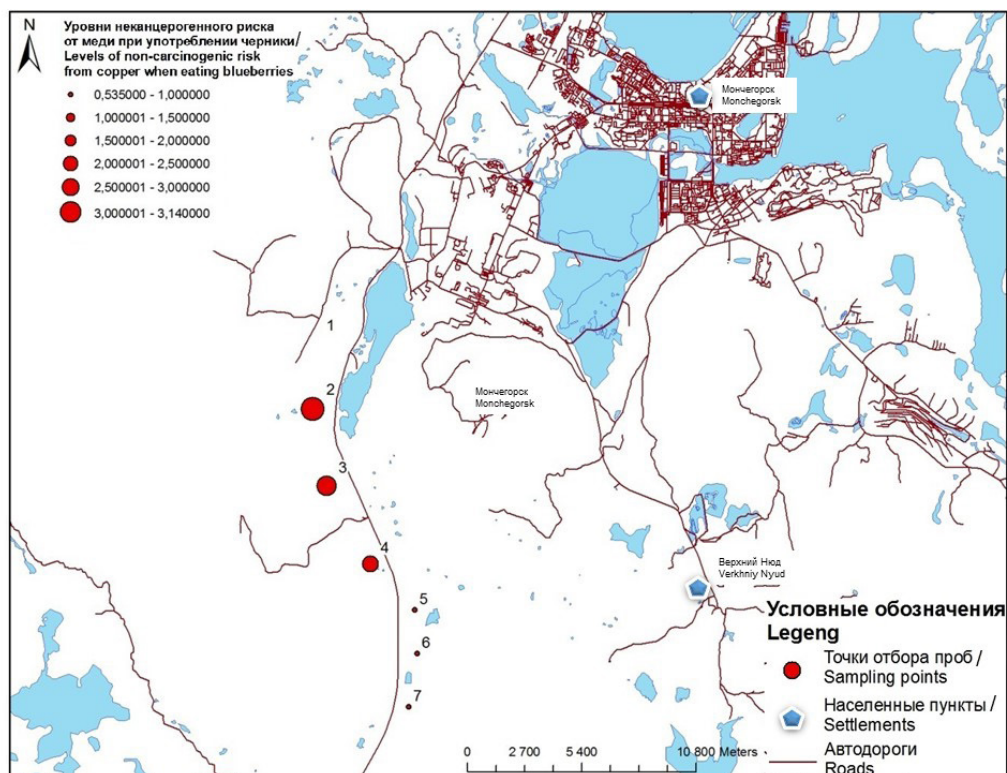


Рис. 1. Уровни неканцерогенного риска от воздействия меди при употреблении черники  
Fig. 1. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to copper in blueberries

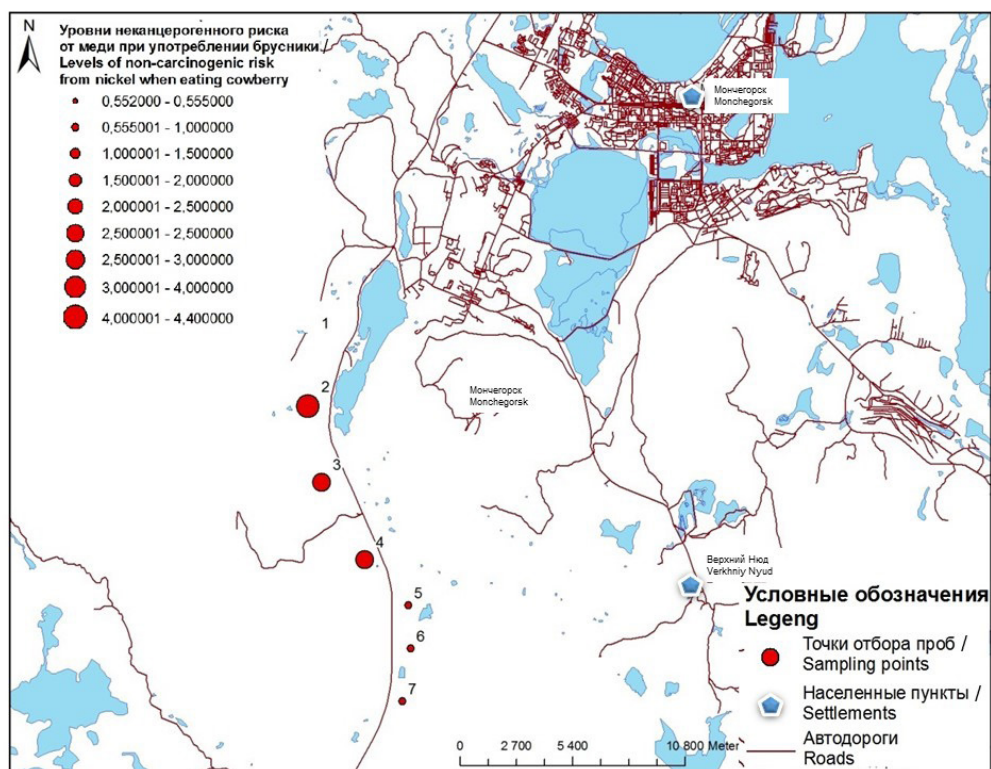


Рис. 2. Уровни неканцерогенного риска от воздействия меди при употреблении брусники  
Fig. 2. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to copper in cowberries

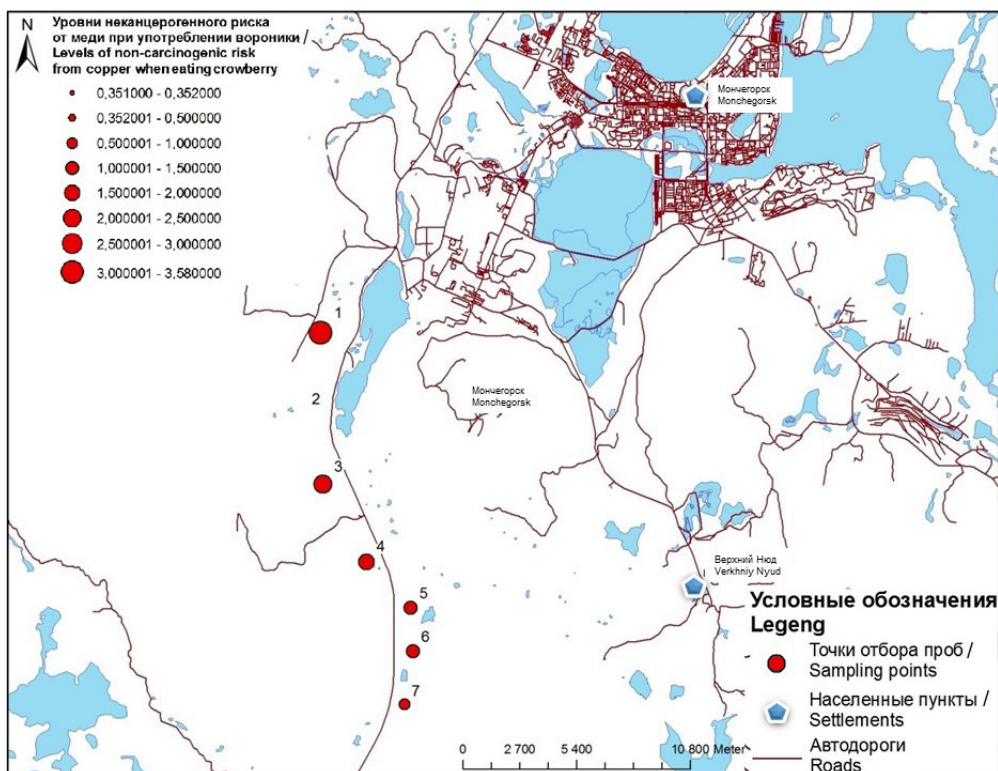


Рис. 3. Уровни неканцерогенного риска от воздействия меди при употреблении вороники  
Fig. 3. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to copper in crowberries

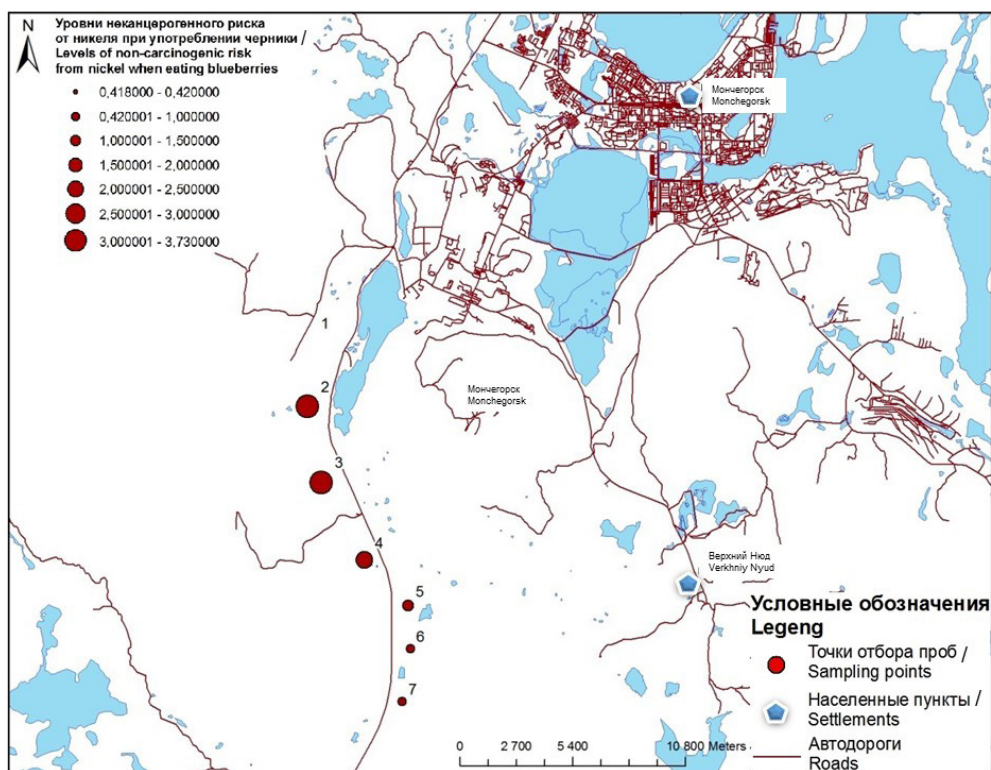


Рис. 4. Уровни неканцерогенного риска от воздействия никеля при употреблении черники  
Fig. 4. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to nickel in blueberries

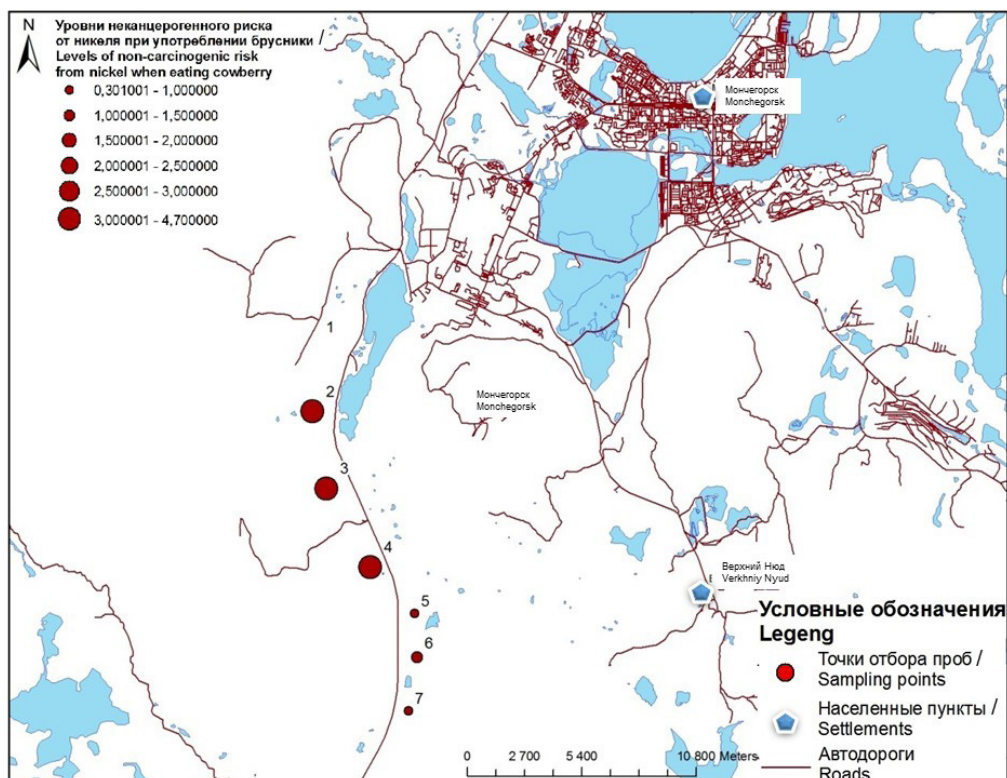


Рис. 5. Уровни неканцерогенного риска от воздействия никеля при употреблении брусники  
Fig. 5. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to nickel in cowberries

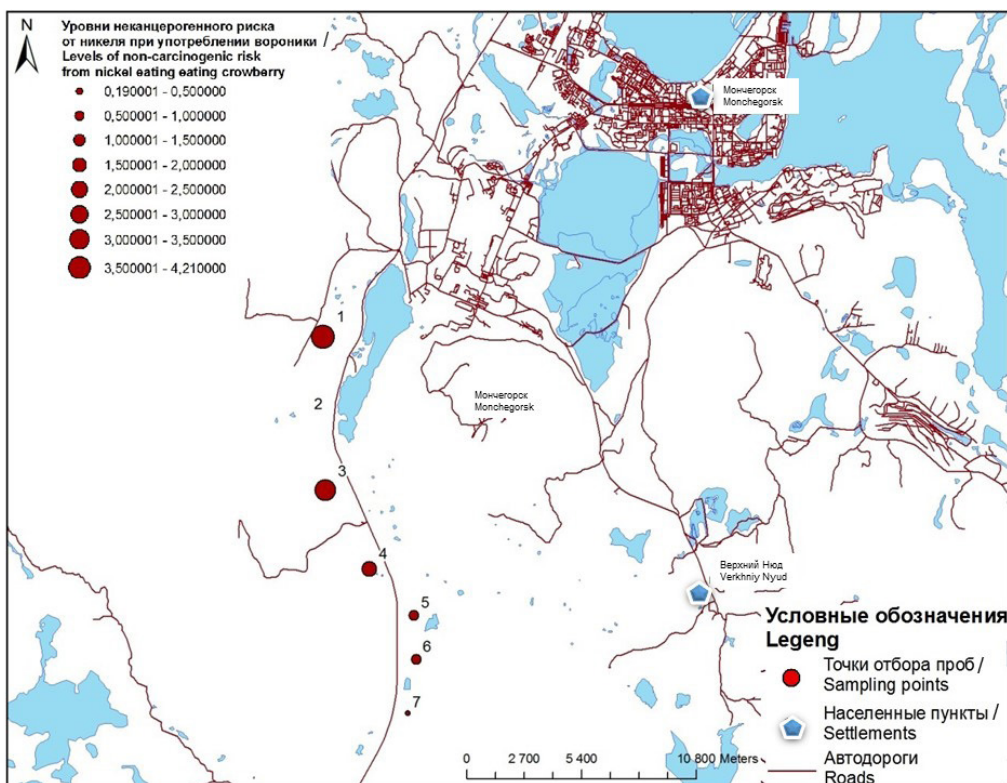


Рис. 6. Уровни неканцерогенного риска от воздействия никеля при употреблении вороники  
Fig. 6. Levels of non-carcinogenic risk from oral exposure to nickel in crowberries

Неприемлемо высокие значения риска для здоровья населения, формируемые при употреблении в пищу ягод черники, брусники и вороники, произрастающих на расстоянии до 20 км от предприятия, диктуют необходимость разработки гигиенических рекомендаций по митигации риска. В качестве таковых можно рекомендовать ограничение потребления указанных ягод на уровне не более 6 кг в год. Также следует полностью отказаться от сбора ягод, произрастающих на расстоянии менее 15 км от комбината «Североникель».

Следует также обратить внимание на ряд неопределенностей, которые могут повлиять на корректность результатов оценки риска.

1. В рамках настоящего исследования рассматривался сценарий перорального потребления дикорастущих ягод черники, брусники и вороники общей массой 12,2 кг/год. При этом фактический уровень потребления может существенно отличаться от выбранной оценочной величины как в большую, так и в меньшую сторону. Кроме того, рассматриваемая на основе рекомендаций ВОЗ масса тела 70 кг может также значительно отличаться в большую или меньшую сторону у отдельных индивидуумов. Перечисленные особенности способны значительно повлиять на результаты оценки экспозиции и, как следствие, на значения рассчитываемого риска.

2. Для никеля в настоящее время нет убедительных доказательств канцерогенной опасности при пероральном поступлении. Имеющиеся значения фактора канцерогенного потенциала [18–20] относятся к ингаляционному пути его поступления. Тем не менее полностью исключить канцерогенные эффекты, обусловленные никелем при пероральном поступлении в организм человека, было бы ошибочным.

**Выводы.** Проведенный анализ полученных значений риска от воздействия никеля и меди, содержащихся в дикорастущих ягодах черники, брусники, вороники, отобранных в непосредственной зоне влияния предприятия АО КГМК – комбината «Североникель», позволил сделать ряд выводов.

1. Впервые проведена оценка риска для здоровья населения от систематического употребления в пищу дикорастущих ягод черники, брусники и вороники, произрастающих в зоне влияния крупного металлургического предприятия, на примере комбината «Североникель».

2. Прогнозируемые уровни канцерогенного риска от воздействия никеля при употреблении населением дикорастущих ягод оцениваются как неприемлемо высокие во всех рассматриваемых сценариях.

3. Уровни хронического неканцерогенного риска от воздействия меди и никеля оцениваются как неприемлемо высокие применительно к мониторинговым площадкам на расстоянии до 15–20 км от границ предприятия.

4. Протяженность зоны влияния комбината «Североникель» с позиции риска для здоровья населения может оцениваться в южном направлении более чем на 20 км от границы промышленной площадки предприятия.

5. Необходима разработка гигиенических рекомендаций для населения, употребляющего

в пищу дикорастущие ягоды черники, брусники и вороники, собираемые в зоне влияния комбината «Североникель».

6. Проблема накопления загрязняющих веществ в ягодах дикорастущих кустарничков, используемых в качестве пищевых ресурсов, предполагает проведение расширенных дополнительных исследований на всей территории региона.

#### Список литературы

1. Кизеев А.Н., Ушамова С.Ф., Жиров В.К., Ивкова Н.В. Оценка свойств растений черники, произрастающей на территории с незначительно повышенным радиационным фоном // *Экология человека*. 2012. № 6. С. 37–42.
2. Kotov V, Nikitina E. Norilsk Nickel: Russia wrestles with an old polluter. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 1996;38(9):6–37. doi: 10.1080/00139157.1996.9930998
3. Баркан В.Ш. Проблемы загрязнения среды // *Наука и бизнес на Мурмане. Серия экология и человек*. 2000. Т. 2. № 5 (20). С. 31–34.
4. Steinnes E, Lukina N, Nikonov V, Aamlid D, Røyset O. A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula. *Environ Monit Assess*. 2000;60(1):71–88. doi: 10.1023/A:1006165031985
5. Кизеев А.Н., Жиров В.К., Ушамова С.Ф. и др. Экогеосистемы горнодобывающего класса Северо-Запада Восточно-Европейской платформы (Мурманская область). В кн: *Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика)*. Воронеж: ОАО «Воронежская областная типография – издательство им. Е.А. Болховитинова», 2015. С. 282–326.
6. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 316 с.
7. Чернышкова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН Издательство «Наука», 2002. 190 с.
8. Коротков В.Н., Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В. Восстановление растительности на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска (Мурманская область, Россия) // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2019. Т. 4. № 1. С. 1–18. doi: 10.21685/2500-0578-2019-1-4
9. Баркан В.Ш., Панкратова Р.П., Сирина А.В. Накопление никеля и меди лесными ягодами и грибами, произрастающими в окрестностях комбината «Североникель» (г. Мончегорск) // *Растительные ресурсы*. 1990. Вып. 4. С. 507–508.
10. Исаева Л.Г., Сухарева Т.А. Элементный состав дикорастущих кустарничков в зоне воздействия комбината «Североникель»: данные многолетнего мониторинга // *Цветные металлы*. 2013. № 10 (850). С. 87–92.
11. Лукина Н.В., Никонов В.В. Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // *Лесоведение*. 1993. № 6. С. 34–41.
12. Paatero J, Dauvalter VA, Derome JR, et al. *Effects of Kola Air Pollution on the Environment in the Western Part of the Kola Peninsula and Finnish Lapland: Final Report; 2008*. Accessed March 2, 2022. <http://www.pasvikmonitoring.org/pdf/effects%20of%20kola%20air%20pollution.pdf>
13. Barcan VSh, Kovnatsky EF, Smetannikova MS. Absorption of heavy metals in wild berries and edible mushrooms in area affected by smelter emissions. *Water Air Soil Pollut*. 1998;103:173–195.
14. Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С. и др. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М.: Наука, 2004. 616 с.
15. Бражная И.Э., Быкова А.Е., Судак С.Н., Семенов Б.Н. Исследование безопасности и минерального состава дикорастущего сырья Кольского полуострова //

- Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 11–14.
16. Сухарева, Т.А. Оценка состояния сосновых лесов в зоне влияния медно-никелевых предприятий при уменьшении эмиссионной нагрузки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3 (3). С. 1072–1076.
  17. Дударев А.А., Душкина Е.В., Чупахин В.С., Сладкова Ю.Н. и др. Содержание металлов в местных продуктах питания Печенгского района Мурманской области // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 2. С. 35–40.
  18. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. Москва: Издательство РУДН, 2003. 430 с.
  19. Integrated Risk Information System. Nickel, soluble salts. Accessed March 2, 2022. [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=271](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=271)
  20. Integrated Risk Information System. Nickel refinery dust. Accessed March 2, 2022. [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=272](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=272)
- ### References
1. Kizeev AN, Ushamova SF, Zhirov VK, Ivkova NV. Assessment of properties of bilberry-bush growing around Kola nuclear power plant. *Ekologiya Cheloveka [Human Ecology]*. 2012;(6):37–42. (In Russ.)
  2. Kotov V, Nikitina E. Norilsk Nickel: Russia wrestles with an old polluter. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*. 1996;38(9):6–37. doi: 10.1080/00139157.1996.9930998
  3. Barkan VSh. [Problems of environmental pollution.] *Nauka i Biznes na Murmane. Seriya Ekologiya i Chelovek*. 2000;2(5(20)):31–34. (In Russ.)
  4. Steinnes E, Lukina N, Nikonov V, Aamlid D, Røyset O. A gradient study of 34 elements in the vicinity of a copper-nickel smelter in the Kola Peninsula. *Environ Monit Assess*. 2000;60(1):71–88. doi: 10.1023/A:1006165031985
  5. Kizeev AN. [Mining environmental geosystems in the North-West of the East European Platform (Murmansk region).] In: Kizeev AN, Zhirov VK, Ushamova SF, et al. *Environmental Geology of Large Mining Areas of Northern Eurasia (Theory and Practice)*. Voronezh: JSC Voronezh Regional Printing House – E.A. Bolkhovitinov Publishing House; 2015:282–326. (In Russ.)
  6. Lukina NV, Nikonov VV. *[Nutritional Regime of Northern Taiga Forests: Natural and Technogenic Aspects.]* Apatity: RAS Kola Research Center Publ.; 1998. (In Russ.)
  7. Chernenkova TV. *[Response of Forest Vegetation to Industrial Pollution.]* Moscow: Nauka Publ.; 2002. (In Russ.)
  8. Korotkov VN, Koptsik GN, Smirnova IE, Koptsik SV. Restoration of vegetation on mine lands near Monchegorsk (Murmansk Region, Russia). *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2019;4(1):1–18. (In Russ.) doi: 10.21685/2500-0578-2019-1-4
  9. Barkan VSh, Pankratova RP, Silina AV. [Accumulation of nickel and copper by forest berries and mushrooms growing in the vicinity of the Severonikel plant (Monchegorsk).] *Rastitel'nye Resursy*. 1990;(4):507–508. (In Russ.) Accessed March 2, 2022. <http://www.lapland-nature.info/ru/17.html>
  10. Isaeva LG, Sukhareva TA. Elemental composition of wild small shrubs in the area of influence of “Severonikel” combine: Data of long-term monitoring. *Tsvetnye Metally*. 2013;(10(850)):87–92. (In Russ.)
  11. Lukina NV, Nikonov VV [Absorption of airborne industrial pollutants by pine forest plants in the north-west of the Kola Peninsula]. *Lesovedenie*. 1993;(6):34–41. (In Russ.)
  12. Paatero J, Dauvalter VA, Derome JR, et al. *Effects of Kola Air Pollution on the Environment in the Western Part of the Kola Peninsula and Finnish Lapland: Final Report; 2008*. Accessed March 2, 2022. <http://www.pasvikmonitoring.org/pdf/effects%20of%20kola%20air%20pollution.pdf>
  13. Barcan VSh, Kovnatsky EF, Smetannikova MS. Absorption of heavy metals in wild berries and edible mushrooms in area affected by smelter emissions. *Water Air Soil Pollut*. 1998;103:173–195.
  14. Nikonov VV, Lukina NV, Bezel' VS, et al. *[Dispersed Elements in Boreal Forests.]* Moscow: Nauka Publ.; 2004. (In Russ.)
  15. Brazhnaya IE, Bykova AE, Sudak SN, Semenov BN. [Investigation of safety and mineral composition of wild raw materials of the Kola Peninsula.] *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2012;15(1):11–14. (In Russ.)
  16. Sukhareva TA. Assessment the pine forests state in zone of copper-nickel enterprises influence at emission loading reduction. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2013;15(3-3):1072–1076. (In Russ.)
  17. Dudarev AA, Dushkina EV, Chupahin VS, et al. Metal content of local foods in Pechenga district of Murmansk region. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya*. 2015;(2):35–40. (In Russ.)
  18. Chernykh NA, Sidorenko SN. *[Ecological Monitoring of Toxicants in the Biosphere.]* Moscow: RUDN Publ.; 2003. (In Russ.)
  19. Integrated Risk Information System. Nickel, soluble salts. Accessed March 2, 2022. [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=271](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=271)
  20. Integrated Risk Information System. Nickel refinery dust. Accessed March 2, 2022. [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=272](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=272)

