

## ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

### Экология

УДК 631.41:574.24-(571.56-17)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

Оригинальная статья

### Элементный химический состав почв и растений Северной Якутии, его эколого-биогеохимическая оценка

А. И. Сысо<sup>1</sup>, Р. В. Десяткин<sup>2,✉</sup>, М. Х. Николаева<sup>2</sup>, А. З. Иванова<sup>2</sup>,  
Н. В. Филиппов<sup>2</sup>, А. Р. Десяткин<sup>2,3</sup>, С. А. Худяев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉rvdes@ibpc.ysn.ru

#### Аннотация

В естественных биогеоценозах тундры и северной тайги приморских низменностей арктической зоны Северной Якутии почвы и растения имеют региональные особенности содержания химических элементов, их агрохимического, биогеохимического и гигиенического статуса. На примере Усть-Янского и Нижнеколымского районов изучены состав и свойства основных типов почв, общее содержание в почвах и ресурсных растениях биологически важных химических элементов (N, P, K, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B, As, Be, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, V, Sb, Sr), а также концентрация в почвах подвижных в разных экстрагентах форм S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb. Выявлены различные подвижность химических элементов в почвах и их доступность растениям. Общее количество в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr по агрохимическим и биогеохимическим нормативам находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, а бора превышает его. Гигиенически нормируемое содержание Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb в почвах ниже значений ПДК и ОДК. По сравнению с кларками элементов в растительности суши, агрохимически и биогеохимически нормальным их содержанием, в растениях Северной Якутии низки концентрации K, Ca, Cu, Mo, Pb, Cr, Be и высоки – Fe, Mn, Hg, Cd.

**Ключевые слова:** Арктика, тундра, северная тайга, почвы, растения, макро- и микроэлементы

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ по теме номер 19-29-05151; регистрационный номер АААА-А20-120061190009-9, также под эгидой FWRS-2021-0026; номер гос.регистрации в ЕГИСУ: АААА-А21-121012190036-6; номер гос.регистрации в ЕГИСУ: 1021052103985-7-1.6.23, также под эгидой FWGR-2021-0006.

**Для цитирования:** Сысо А.И., Десяткин Р.В., Николаева М.Х., Иванова А.З., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В., Худяев С.А. Элементный химический состав почв и растений Северной Якутии, его эколого-биогеохимическая оценка. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):78–93. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

Original article

### Elemental chemical composition of soils and plants of Northern Yakutia, its ecological and biogeochemical assessment

A. I. Syso<sup>1</sup>, R. V. Desyatkin<sup>2,✉</sup>, M. Ch. Nikolaeva<sup>2</sup>, A. Z. Ivanova<sup>2</sup>,  
A. R. Desyatkin<sup>2,3</sup>, N. V. Filippov<sup>2</sup>, S. A. Khudyaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,*

*Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, Russian Federation*

✉rvdes@ibpc.ysn.ru

## Abstract

This study investigated the composition and properties of the main soil types in the natural biogeocenoses of tundra and taiga in the coastal lowlands of the Arctic zone of Northern Yakutia. We have identified the total content of biologically important chemical elements in the soils and resource plants (N, P, K, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B, As, Be, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, V, Sb, and Sr), and the concentration of mobile forms of S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, and Pb in different extractants. We also specified the influence of soil composition and properties on the content of macro- and microelements. Various mobilities of chemical elements in soils and their availability to plants have been revealed. The amounts of chemical elements in the studied soils and plants were estimated according to agrochemical, biogeochemical and hygienic criteria and standards.

**Keywords:** Arctic, tundra, northern taiga, soils, plants, macro- and microelements

**Funding.** This study was supported by the RFBR grant theme number 19-29-05151; registration number AAAA-A20-120061190009-9, and state program FWRS-2021-0026; registration number AAAA-A21-121012190036-6; project number 1021052103985-7-1.6.23, and state program FWRS-2021-0006.

**For citation:** Syso A.I., Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Filippov N.V., Khudyaev S.A. Elemental chemical composition of soils and plants of Northern Yakutia, its ecological and biogeochemical assessment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):78–93. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-78-93>

## Введение

Арктические экосистемы весьма чувствительны к глобальному изменению климата Земли и промышленному освоению циркумполярных территорий. Эти природные и техногенные факторы существенно влияют на состояние окружающей среды, всех компонентов наземных экосистем, качество жизни и хозяйственной деятельности населения Российской Арктики и Субарктики. Поэтому здесь актуальны изучение и оценка техногенного загрязнения окружающей среды и природной биогеохимической специфики территорий. Особый научный и практический интерес представляет определение количества и статуса биологически важных химических элементов в почвах и ресурсных растениях еще мало изученных наземных экосистем тундры и северной тайги приморских низменностей Северной Якутии.

Элементный химический состав (ЭХС) почв и растений служит индикатором почвенного плодородия и обеспеченности растений элементами-биофилами, наличия загрязнения окружающей среды, а также природных или техногенных геохимических аномалий с очень высокими концентрациями химических элементов в почвах, угрожающими жизни растений, животных и человека. Учитывая происходящие природные и техногенные изменения экосистем Арктики, актуально изучение ЭХС почв и растений в естест-

венных биоеценозах для познания природной биогеохимической специфики разных ее районов, а также определения фоновых значений концентраций химических элементов, позволяющих оценить загрязнение ими окружающей среды и массопоток поллютантов по трофической цепи. Такие исследования ведутся в разных районах Арктики. Однако опубликованных их результатов в мире в целом немного. В России ЭХС почв и растений относительно хорошо изучен в европейской части Арктики, слабее на севере Урала, Западной и Средней Сибири, Якутии. Зона Арктики остается белым мало изученным северным краем карты биогеохимического районирования России [1].

На территории Республики Саха (Якутия) изучение микроэлементов в почвах и растениях в основном проводилось в ее центральной и южной частях. А.Д. Егоровым с его коллегами [2] было выявлено низкое содержание в почвах и лугопастбищных растениях Co и J, высокое – Fe, Mn, Cu, Zn, что позволило объяснить распространенность в республике эндемических заболеваний (беломышечная болезнь, эндемичный зоб), провести биогеохимическое районирование лугопастбищных территорий. Д.Д. Саввинов и Н.Н. Сазонов [3] расширили представления о биогеохимическом статусе J, Fe, Mn, Zn, Ni, Ba, Sr в почвах и растениях естественных и



Рис. 1. Местоположения объектов исследований в Северной Якутии

Fig. 1. Location of study plots in the Northern Yakutia

техногенно нарушенных ландшафтов, специфике биогеохимических районов. Г.А. Андрианова [4] выявила в Центральной Якутии провинцию с повышенным содержанием в почвах и растениях В, Sr, Ba и пониженным содержанием в растениях Co, Cu, Fe, Mn.

Оценка элементного статуса населения в разных медико-географических зонах Якутии показала, что в полярной зоне «элементный портрет» взрослого населения, характеризуемый по ЭХС волос мужчин и женщин, проявляется в гиперэлементозах Cd, Fe, Mn, K, Na, Pb, V, Zn, Hg и гипoeлементозах Ca, Co, I, Zn [5].

Социально-экономическое развитие России нуждается в эколого-биогеохимической оценке ее территорий, в том числе в новых данных о фоновом содержании биологически важных макро- и микроэлементов в почвах и растениях арктической зоны Якутии. В настоящей работе представлены впервые полученные в 2020–2021 гг. результаты определения количества и комплексной оценки статуса 20 химических элементов в основных типах почв и видах ресурсных растений естественных биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии.

### Методы и материалы исследования

Полевые исследования в Северной Якутии проводились в августе 2020 и 2021 гг. на территориях Усть-Янского и Нижнеколымского районов. Объектами исследований служили почвы и растения тундровых и северо-таежных биогео-

ценозов, сформировавшихся на разных формах рельефа, распространенные в приморских низменностях, в нижнем течении рек Яны и Колымы, на побережье Северного Ледовитого океана (рис. 1). Генезис, состав и свойства почв этой части Якутии изучаются с середины прошлого века [6–11].

В наших исследованиях диагностику и наименование изученных почв приморских низменностей Северной Якутии выполняли по Классификации почв России [12], а также по WRB 2014 [13].

На западе изученной территории, в Усть-Янском районе, на Яно-Индигоирской низменности, на надпойменных террасах р. Яны были исследованы почвы и растения двух тундровых биогеоценозов (точки 1 и 2 на рис. 1).

Первый участок, с координатами 70°34'0,18" N, 134°57'38,62" E, находился в 600 м от р. Яны в окрестностях п. Северный. Разрез заложен в западине между буграми (былларами) посреди бугристо-западинного криогенного микрорельефа. Почва – криозем грубогумусированный глееватый с признаками криотурбаций (*Turbic Reductaquic Cryosol (Loamic)*). На глубине 77 см залегают мерзлые слабодистые четвертичные легкосуглинистые отложения. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из генетических горизонтов разреза У-2-20, имеющего формулу почвенного профиля Оао (0–6(7) см)–СR (6(7)–9(18) см)–СR@ (9(18)–34(45) см)–Сg@L (34(45)–77 см).

Растительный покров представлен ивово-березовым сообществом моховым с багульником и

осокой. ЭХС растений фитоценоза характеризуется растительными пробами листьев карликовой березки (*Betula nana*), ивы красивой (*Salix pulchra*), голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum*), багульника болотного (*Ledum palustre*), надземной биомассы осоки ситнической (*Carex juncella*).

Второй биогеоценоз, с координатами 70°34'13,65" N, 134°57'00,20" E, находился в 1 км от р. Яна недалеко от п. Северный. Разрез располагался на надпойменной террасе, имеющей небольшой (2–3°) уклон на юг и бугристо-западный микрорельеф. Почва – торфяно-криозем глееватый (*Reductaquic Histic Cryosol (Loamic)*), с глубины 62 см лежащий на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза У-3-20, имеющего формулу почвенного профиля О (0–5 см)–Т (5–10(20) см)–СR (10(20)–35(37) см)–СR<sub>hi</sub>,g (35(37)–45 см)–Сg<sub>L</sub>(45–62 см). Растительный покров – листовенничное редколесье моховое с пятнами лишайника, березой, ивой, багульником, брусникой. ЭХС растений характеризуется пробами хвои листовенницы Каяндера (*Larix cajanderi*), смеси лишайников *Flavocetraria cucullata*, *Cladonia arbuscula*, *Cladonia amaurocraea*, биомассы мха *Sanionia uncinata*.

В Нижнеколымском районе Якутии, на Колымской низменности, исследованы почвы и растения трех биогеоценозов (точки 3–5 на рис. 1). Самый северный из них, с координатами 70°43'45,06" N, 159°27'15,37" E, находился в резервате «Курдигино-Крестовая» на плакорном участке тундры, подверженной термокасту, в 200 м от побережья Восточно-Сибирского моря Северного Ледовитого океана. Изученный арктикотундровый биогеоценоз располагался в западине между былларами. Он сформировался на мерзлотной серогумусовой глееватой почве с признаками криогенной гомогенизации и тиксотропии (*Reductaquic Cryosol (Loamic, Thixotropic)*), с глубины 54 см лежащей на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза 2-21-21 К-Кр., имеющего формулу почвенного профиля О (0–2 см)–АУ (2–5 см)–Сm,g<sub>L</sub> 5–54 см. В растительном покрове преобладали осоки с примесью разнотравья и пушицы. ЭХС растений характеризуется пробой надземной биомассы вейника Хольма (*Calamagrostis holmii*).

Южнее, на границе тундры и северной тайги Колымской низменности, в правобережье р. Ко-

лыма находились редколесные биогеоценозы. На неровном участке (с координатами 68°44'47,92" N, 161°22'18,57" E), имеющем слабый уклон коренного берега к реке и неровный бугристо-западный рельеф, располагался биогеоценоз, растительный покров которого представлял листовенничное редколесье кустарничково-моховое. Он сформировался на торфяно-криоземе глееватом (*Reductaquic Histic Cryosol (Loamic)*), с глубины 76 лежащем на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза К-3-21, имеющего формулу почвенного профиля О (0–3(5) см)–Т (3(5)–10(15) см)–СR (10(15)–48 см)–Сg<sub>L</sub> (48–76 см). ЭХС растений характеризуется пробами листьев голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum*) и надземной биомассы осоки ситнической (*Carex juncella*).

На участке с координатами 68°44'48,20" N, 161°22'19,32" E, находящемся на коренном берегу р. Колыма, на вершине небольшого бугра с неровным, трещиноватым, бугристо-западным микрорельефом изучен биогеоценоз, в котором, по сравнению с предыдущим, в листовенничном редколесье кустарничково-моховом больше мха и лишайников. Почва – криозем типичный (*Haplic Cryosol (Loamic)*), с глубины 52 см лежащий на мерзлых покровных отложениях. Состав и свойства почвы характеризуются пробами из разреза К-4-21, имеющего формулу почвенного профиля О(ОТ) (0–11(14) см)–СR (11(14)–20(22) см)–СR(С) ⊥ 20(22)–52 см.

ЭХС растений фитоценоза характеризуется пробой листьев березки карликовой (*Betula nana*).

В разрезах почвенные пробы отбирались из: 1) верхних, преимущественно органогенных, горизонтов с подстилкой (О<sub>ao</sub>, О+Т, О+АУ, О(ОТ)); 2) корнеобитаемых минеральных горизонтов (СR); 3) почвообразующих пород над многолетней мерзлотой (СR@, Сg<sub>L</sub>, Сm,g<sub>L</sub>, СR(С) ⊥).

Изученные растения относятся к ресурсным. Они служат кормом для диких и домашних оленей Крайнего Севера [14], других травоядных животных, звеном биогеохимической цепи почва–растение–животные–человек, а также источником лекарственного и иного растительного сырья.

Листья кустарников *Betula nana* и *Salix pulchra* – существенный компонент питания копытных животных на пастбищах. В листовенничном редколесье кормом служит хвоя *Larix cajanderi*. Листья *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Ledum palustre* – источники лекарственно-

го сырья. Травянистые растения (*Carex juncella*, *Calamagrostis holmii*) создают значительные запасы кормовой фитомассы. Лишайники *Flavocetraria cucullata*, *Cladonia arbuscula*, *Cladonia amaurocraea* – важный источник питания оленей и лекарственного сырья.

Выбор изученных макро- и микроэлементов в почвах и растениях обусловлен их ролью в жизни живых организмах и окружающей среде: 1) N, P, K, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B – абсолютно незаменимые для живых организмов элементы-биофилы или эссенциальные химические элементы, оцениваемые в почвах и растениях по агрохимическим и биогеохимическим нормативам; 2) Sr – антагонист кальция, оцениваемый в почвах и растениях по биогеохимическим нормативам; 3) As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Sb, Zn – приоритетные техногенные загрязнители окружающей среды (поллютанты) высокие концентрации которых опасны для животных организмов, прежде всего человека, оцениваемые в почвах и растительной продукции по биогеохимическим и гигиеническим нормативам.

Почвенные пробы брались снизу вверх по профилю почв. Образцы листьев и побегов формирования кустарников срезались с верхних и боковых частей 10 растений, хвои лиственницы – с боковых частей пяти растений. Пробы травянистых растений срезались на высоте 5 см над уровнем почвы. Пробы лишайников брались после удаления 1–2 см нижней части. Все пробы помещались в полиэтиленовые пакеты.

Подготовка проб к анализам включала их высушивание до состояния воздушно-сухого вещества. Растительные пробы сушили при температуре 60 °С в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией, а почвенные пробы при комнатной температуре. Растительные пробы измельчали и помещали в полиэтиленовый пакет. Почвенные пробы для общих анализов размельчались фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке и просеивались на ситах: минеральные почвенные пробы – с ячейками 1 мм, а торфянистые – 2 мм.

В водной вытяжке измеряли реакцию среды (рН H<sub>2</sub>O) почв потенциометрическим методом, концентрацию водорастворимых солей – кондуктометрическим методом по удельной электрической проводимости (ЕС, мСм/см) и гравиметрическим методом по плотному остатку (П.О.), сульфат-иона (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) и фосфат-иона (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) – методом капиллярного электрофореза.

В почвах содержание частиц менее 0,01 мм – физической глины (Ф.Г.) определяли пипеточным методом, а органического вещества (ОВ) – по потере при прокаливании в муфельной печи при температуре 550 °С.

Обеспеченность почв подвижными фосфором и калием оценивали по их количеству, экстрагируемому 0,2N HCl по методу Кирсанова, а при рН более 6,1 дополнительно – 0,5 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>2</sub> с рН 9,0 по методу Мачигина.

Концентрацию подвижной формы Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb измеряли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии в экстракте из почв 1 M ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с рН 4,8 (1 MCH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) при отношении почвы к раствору 1:10.

Общее содержание в почвах и растениях азота определяли методом Кьельдаля, количество ртути – методом «холодного пара», сурьмы и мышьяка – гидридным методом на атомно-абсорбционном спектрометре.

Для определения общего содержания B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sr, V, Zn пробы почв и растений предварительно озольли при температуре 550 °С в течение 2 и 4 ч соответственно, а затем растирали до состояния пыли в агатовой ступке. В отдельной части общей золы (А) растений, после измерения ее количества, определялось содержание золы, не растворимой в 10 % HCl (а).

Измерение общего (валового) содержания химических элементов в пробах выполняли методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии с использованием дугового аргонного двухструйного плазмотрона, спектрометра (PGS-2) и многоканального анализатора эмиссионных спектров. Калибровку и контроль точности измерений химических элементов в пробах вели по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв и растений. Относительная погрешность измерений была в пределах 10 %.

В пробах измерялось количество гигроскопической влаги гравиметрическим методом после высушивания в сушильном шкафу при 105 °С. Все количественные результаты измерений веществ и химических элементов в пробах рассчитывались на абсолютно-сухое вещество (а.с.в.) проб.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel и STATISTICA 10.0. Кор-

реляционный анализ проводили с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена ( $r_s$ ) и критического уровня значимости  $p$  0,05.

### Результаты исследования и обсуждение

Результаты исследований показали, что в тундре и северной тайге Северной Якутии поверхностные органогенные горизонты (О<sub>ао</sub>, О+Т, О+АУ, О(ОТ)) арктотундровых, мерзлотных тундровых и мерзлотных таежных почв существенно отличаются по составу и свойствам от нижележащих минеральных корнеобитаемых горизонтов (С<sub>г</sub>) и почвообразующих пород под мерзлотой (С<sub>г</sub>@, С<sub>г</sub>⊥, С<sub>г</sub>g⊥, С<sub>г</sub>(С) ⊥)(табл. 1 и 2).

Органогенные горизонты имели сильноокислую реакцию среды ( $pH$   $H_2O$  <4,5) и большее, чем в минеральных горизонтах, содержание N, P, Hg и Sb. Более кислая реакция среды органогенных горизонтов свойственна тундровым почвам приморских низменностей Северной Якутии [6, 8, 10]. Возможно, она – следствие недостатка в них оснований (K, Na, Ca, Mg) для нейтрализации органических кислот.

В минеральных горизонтах почв реакция среды слабокислая и близкая к нейтральной, гранулометрический состав преимущественно легкосуглинистый, содержание органического вещества малое. По сравнению с органогенными горизонтами, в минеральных выше содержание K, Mo, B, As, Be, Cr, Ni, Pb, V, Sr (см. табл. 1). Большинство зольных химических элементов почвы наследуют от почвообразующих пород, но на распределение P, Ca, Mn, Zn, Cu, Co, Cd в почвенном профиле сильное влияние также оказывают биогенная аккумуляция, закрепление органическими и минеральными компонентами почв, реакция среды их горизонтов.

Корреляционный анализ влияния свойств почв на их ЭХС (для выборки  $n = 12$  при  $r_s = 0,58$  и  $p = 0,05$ ) выявил достоверные связи между ними. Увеличение значений реакции среды ( $pH$ ) почв положительно влияло на содержание в них K, B, As, Be, Cr, V, Sr, но отрицательно – на N, P, Hg, Sb. Концентрация последних была выше в более кислых органогенных горизонтах. Наибольшее содержание N и P было обусловлено не столько кислой реакцией среды, сколько высокой биогенной аккумуляцией этих биофильных элементов растениями и закреплением их в органическом веществе почв, с которым выявлены корреляционные связи N  $r = 0,99$ , P  $r = 0,86$ . Весьма сильно с органическим веществом связаны Hg

( $r = 0,97$ ), Sb ( $r = 0,72$ ), чья концентрация была наибольшей в органогенных горизонтах. Достоверные отрицательные связи с органическим веществом почв показали K, B, As, Be, Cr, Ni, Sr. Вероятно, их количество в почвах зависело от других факторов, таких как состав породообразующих и акцессорных минералов в почвообразующих породах. Количество частиц физической глины в почвах достоверное влияние оказало на содержание Ca, Mn, Zn, Co, Pb, V. Не выявлено достоверного влияния свойств и состава почв на концентрацию в них Cu, Mo, Cd.

Указанные выше природные факторы почвообразования могли быть причиной изменения содержания B, As, Be, Cr, V сверху вниз профилей почв, а также с юга на север приморских низменностей Якутии (см. табл. 1).

Сопоставление полученных данных об ЭХС тундровых почв Северной Якутии (см. табл. 1) с фоновым ЭХС тундровых почв Западной Сибири [15], Западного Таймыра [16] и Восточно-Центральной Аляски [17] показало близкий уровень содержания в них Be, Co, Mn, Zn, Pb, V, Sr. Однако, в почвах Таймыра выше было содержание Cu, Ni, Sb, что, вероятно, обусловлено наличием здесь природной медно-никелевой геохимической аномалии. В тундровых почвах Якутии выше оказалось содержание As и Cd, что, возможно, также обусловлено природной геохимической спецификой этого региона.

Эколого-биогеохимическая оценка ЭХС тундровых почв Северной Якутии выявила некоторую его специфику. Общее содержание большинства микроэлементов в почвах было близко кларкам их в почвах мира, приведенным А. Кабата-Пендиас [18] (см. табл. 1). Выше кларка оказалось количество As и Be в почвах. В целом схожа оценка количества химических элементов в почвах с их кларками в земной коре [19]. Содержание Be в изученных почвах мало отличалось от кларка. Оценка валового содержания микроэлементов в почвах по агрохимическим и биогеохимическим критериям [1, 20, 21] говорит о том, что количество в них Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, только количество бора превышает его. Возможно, последнее связано с наличием в мерзлотных ландшафтах провинции с повышенным содержанием бора в почвах и растениях, выделенной Г.А. Андриановой [4] в Центральной Якутии.

Таблица 1

Реакция среды и содержание физической глины, органического вещества, макро- и микроэлементов в горизонтах почв Северной Якутии и критерии его эколого-биохимической оценки

Table 1

The reaction of the environment and the content of physical clay, organic matter, macro- and microelements in soil horizons of the Northern Yakutia and criteria for its ecological and biogeochemical assessment

Номер разреза, почва	Горизонт	Слой, см	pH H <sub>2</sub> O	% в а.с.в.										мг/кг а.с.в.											
				Ф.Г.	ОВ	N	P	K	Ca	Mn	Zn	Cu	Co	Mo	B	As	Be*	Cd	Cr	Ni	Pb	Hg	V	Sb	Sr
				Усть-Янский район Якутии, Яно-Индиговская низменность, надпойменные террасы р. Яна																					
У-2-20. Криозем грубогумусированный глееватый	Оао	0-7	4,1	-	47,2	0,69	0,16	1,82	0,45	469	98	27	19	2,8	37	6,7	2,2	1,33	59	31	22	0,16	50	0,12	162
	CR	7-18	4,4	17,6	9,5	0,25	0,07	2,34	0,58	384	68	31	9	3,1	54	9,4	2,6	0,93	62	31	17	<0,01	70	0,04	185
	CR@	19-45	6,3	22,5	3,8	0,11	0,06	1,99	0,61	450	61	24	9	2,1	64	11,5	2,5	0,67	57	27	15	<0,01	73	0,05	165
У-3-20. Торфяно-криозем глееватый	О+Т	0-20	4,0	-	64,3	1,19	0,13	0,87	0,50	539	63	17	12	1,0	31	5,8	1,3	0,16	38	22	12	0,19	58	0,13	106
	CR	20-35	5,4	20,1	3,2	0,07	0,08	2,25	0,63	564	86	28	11	3,5	62	12,4	3,0	1,49	68	32	17	<0,01	72	0,04	189
	Cg⊥	45-62	7,2	17,2	2,8	0,06	0,05	1,91	0,53	406	64	16	9	1,3	42	13,7	2,0	0,49	53	23	13	<0,01	62	0,06	131
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, резерват «Курдигино-Крестовая», побережье Восточно-Сибирского моря																									
2-21-21 К-Кр. Мерзлотная серогумусовая глееватая почва	О+АУ	0-5	6,3	29,6	6,7	0,19	0,10	2,47	0,77	719	126	25	14	4,6	65	15,3	3,2	2,44	75	34	20	0,07	78	0,02	268
	Cm,g⊥	5-54	6,8	30,8	5,1	0,14	0,09	2,08	0,64	633	94	24	10	1,9	67	15,5	3,5	1,04	71	26	17	<0,01	104	0,05	214
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, правый коренной берег р. Колыма																									
К-3-21. Торфяно-криозем глееватый	О+Т	0-15	4,3	-	54,9	1,00	0,15	0,77	0,81	440	135	19	9	1,2	29	6,3	1,5	0,84	40	18	12	0,17	65	0,09	152
	CR	15-35	6,7	34,8	4,1	0,08	0,05	1,82	0,80	494	85	25	14	1,7	58	13,0	2,5	1,06	62	32	17	<0,01	96	0,02	176
	Cg⊥	48-76	7,2	27,2	3,9	0,10	0,09	2,02	1,05	609	114	36	14	3,3	67	12,7	3,1	1,66	73	34	18	<0,01	102	0,04	256
К-4-21. Криозем типичный	О(ОТ)	0-14	4,1	-	48,3	0,80	0,11	1,04	0,69	543	116	18	9	1,5	41	7,9	1,6	1,63	55	20	18	0,19	87	0,02	139
	CR	14-22	6,1	29,2	4,4	0,09	0,07	2,02	1,01	505	97	23	13	1,7	60	13,4	2,8	1,17	65	31	19	<0,01	96	0,04	226
	CR(C)⊥	22-52	7,4	27,2	3,6	0,07	0,09	2,35	0,93	644	114	24	14	3,0	64	15,7	2,9	1,68	80	36	19	<0,01	99	0,02	228
Критерии оценки значений показателей																									
Кларк в почвах	-	-	-	-	-	-	-	-	-	488	70	39	11	1,1	42	6,8	1,3	0,41	60	29	27	0,07	129	0,67	175
Кларк в земной коре	-	-	-	-	-	0,01	0,07	2,32	2,57	770	75	27	15	1,1	34	5,6	2,3	0,64	92	50	17	0,06	106	0,81	270
АХ/БГХ низкое	-	-	<5,5	<1,0	-	-	-	-	-	400	30	15	7	0,7	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АХ/БГХ высокое	-	-	>8,5	>7,0	-	-	-	-	-	3000	110	60	30	5,0	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600
ПДК/ОДК	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1500	110-220	65-130	-	-	-	5-10	1,3*	1,0-2,0	-	40-80	66-132	2,10	150	4,50	-

Таблица 2

Концентрации подвижных в разных экстрагентах форм макро- и микроэлементов в горизонтах почв Северной Якутии и критерии их оценки

Table 2

Concentrations of mobile forms of macro- and microelements in different extractants in soil horizons of the Northern Yakutia and criteria for their evaluation

Номер разреза, почва	Горизонт	Слой, см	Водная вытяжка				0,2NHCl		0,5 M (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>		1 MCH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> с рН 4,8										
			П.О.	ЕС	S-SO <sub>4</sub>	P-PO <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> o <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Cd	Cr	Ni	Pb		
			%	мСм/см		мг/кг а.с.в.															
			Усть-Янский район Якутии, Яна-Индигирская низменность, надпойменные террасы р. Яна																		
У-2-20. Криозем грубогумусированный глееватый	Oao	0-7	1,92	0,539	152	15,8	55	113	-	-	324	90	9,1	0,8	4,44	0,10	4,31	3,7	2,9		
	CR	7-18	0,336	0,181	60	3,0	156	71	-	-	388	8	0,9	0,9	0,37	0,02	2,74	2,2	1,4		
	CR@	19-45	0,12	0,085	22	1,5	166	47	9	109	69	17	0,4	0,6	<0,15	0,02	<0,15	0,5	0,9		
У-3-20. Торфяно-криозем глееватый	O+T	0-20	2,16	0,429	70	16,6	50	99	-	-	319	297	8,4	0,4	2,04	0,15	2,48	1,9	1,6		
	CR	20-35	0,11	0,062	4	1,6	40	77	-	-	71	42	0,3	0,7	0,16	<0,01	<0,15	0,7	0,8		
	Cg⊥	45-62	0,09	0,052	3	1,1	448	67	10	131	7	46	0,3	0,4	<0,15	<0,01	<0,15	0,2	0,5		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, резерват «Курдигино-Крестовая», побережье Восточно-Сибирского моря																					
2-21-21 К-Кр. Мерзлотная серогумусовая глееватая почва	O+AY	0-5	0,01	0,080	6	<0,7	488	138	3	205	105	48	1,3	0,7	0,20	0,05	0,5	1,0	0,6		
	Cm.g⊥	5-54	0,17	0,065	4	<0,7	476	121	3	188	92	24	0,6	0,8	0,20	0,04	0,7	0,8	0,7		
Нижнеколымский район Якутии, Колымская низменность, правый коренной берег р. Колыма																					
К-3-21. Торфяно-криозем глееватый	O+T	0-15	1,39	0,408	27	14,5	39	84	-	-	297	82	6,7	0,3	1,54	0,67	0,5	1,0	2,4		
	CR	15-35	0,11	0,072	4	<0,7	37	49	7	114	69	22	0,2	0,4	0,30	0,03	0,2	0,2	0,4		
	Cg⊥	48-76	0,06	0,062	4	<0,7	150	92	4	135	20	27	0,4	0,9	0,30	0,06	0,4	0,5	0,6		
К-4-21. Криозем типичный	O(OT)	0-14	1,63	0,427	43	27,5	45	97	-	-	109	102	9,3	0,3	0,76	0,20	1,4	0,7	2,4		
	CR	14-22	0,11	0,065	5	1,7	55	89	-	-	57	24	0,2	0,4	0,30	0,15	0,3	0,4	0,5		
	CR(C) ⊥	22-52	0,06	0,045	5	1,6	781	63	1	118	16	16	0,2	0,4	0,20	0,12	0,2	0,2	0,6		
Критерии оценки значений показателей																					
Агрохимические	Низкие.	-	-	-	<6,0	-	<50 /<300*	<80 /<400*	<15	<200	-	<10,0	<2,0	<0,2	<0,15	-	-	-	-		
	Высокие	>0,20	>0,30	>12,0	-	>150 />601*	>250 />801*	>60	>600	-	>20,0	>5,0	>0,5	>0,30	-	-	-	-	-		
Гигиенические	ПДК	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,0	23,0	3,0	5,0	0,5	6,0	4,0	6,0			

\* Значения для торфяных почв и горизонтов.

\* Values for peat soils and horizons.

В тундровых почвах Северной Якутии общее содержание нормируемых по гигиеническим нормативам [22] химических элементов – Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb было ниже значений их предельно-допустимой концентрации (ПДК) и ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) для почв населенных пунктов и сельскохозяйственных земель. Валовое же содержание As превышало значения его ОДК, а Be – ПДК. Установленный факт мы связываем, во-первых, с природной геохимической спецификой почвообразующих пород Северной Якутии – повышенным содержанием в них As и Be, а во-вторых, с несовершенством российских гигиенических нормативов, не учитывающих наличие региональной геохимической специфики ЭХС почв и даже кларки химических элементов в земной коре и почвах мира.

Концентрации подвижных форм макро- и микроэлементов в органогенных и минеральных горизонтах почв существенно различались. Это сказывалось на подвижности элементов – доле подвижной формы элементов в их валовом содержании. Подобные различия концентраций подвижной формы Zn, Cu, Ni, Fe, Mn в органогенных и нижележащих минеральных горизонтах почв Кольского полуострова отмечались ранее [23]. Выявленные различия в органогенных и минеральных горизонтах тундровых почв Якутии концентраций и подвижности химических

элементов предопределили их неодинаковый агрохимический и гигиенический статус (см. табл. 2). В органогенных горизонтах концентрации водорастворимой формы химических элементов, оцениваемые по П.О., ЕС, S-SO<sub>4</sub>, подвижной в ААБ формы – Mn, Zn, Co были высоки и даже избыточны по агрохимическим критериям. В нижележащих минеральных горизонтах (CR) концентрации водорастворимой формы химических элементов были низкими, подвижной формы Mn и Co – в пределах агрохимической нормы, а Zn – ниже ее. Во всех почвах и их горизонтах концентрации подвижной в ААБ формы Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb не превышали значений ПДК.

Расчеты подвижности (в %) Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb в органогенном (O+T); корнеобитаемом (CR) и надмерзлотном (Cg⊥) горизонтах почв показали существенные различия между ними по большинству химических элементов, за исключением меди. Наибольшую подвижность (более 10 %) имели Mn, Co, Cd, Cr, Ni, Pb в органогенном горизонте (рис. 2). Оценка связи подвижности элементов в почвах с их свойствами и составом выявила достоверное отрицательное влияние повышения значений реакции среды и на концентрацию подвижной формы Fe, Mn, Zn, Co, Cr, Ni, Pb (для выборки  $n = 12$  при  $r_s = 0,58$  и  $p = 0,05$ ). С органическим веществом в почвенных горизонтах выявлена достоверная положительная связь концентрации в них Fe, Mn, Zn,

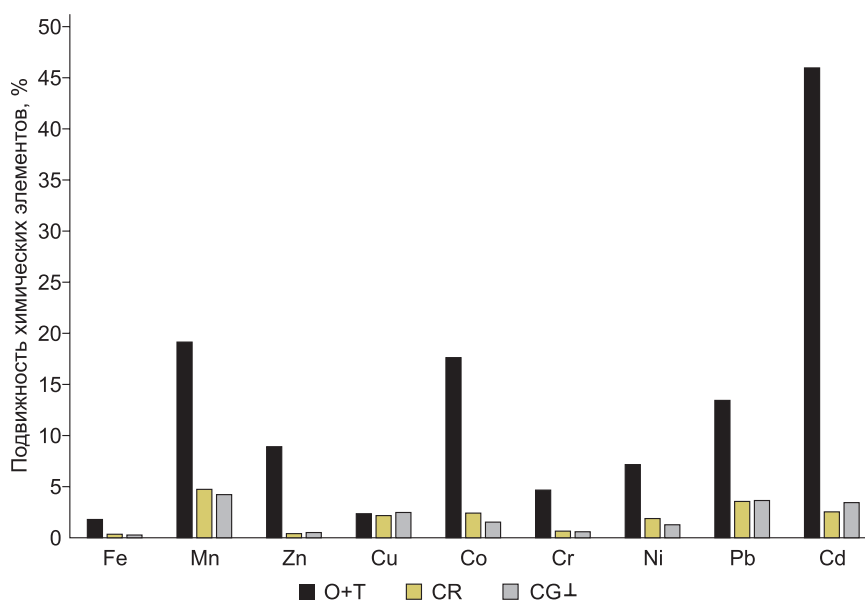


Рис. 2. Средняя подвижность химических элементов в разных горизонтах тундровых почв Якутии

Fig. 2. The average mobility of chemical elements in different horizons of tundra soils in Yakutia

Co, Cd, Cr, Pb. Высокая подвижность металлов могла быть обусловлена процессом образования в органогенных горизонтах и самой верхней минеральной части профиля водорастворимых гумусовых соединений [7].

Особого внимания требует агрохимическая оценка содержания разных форм P, K и S в почвах. Из-за существенного отличия торфяных горизонтов от минеральных по количеству органического вещества и реакции среды, корнеобитаемых минеральных горизонтов от почвообразующих пород по реакции среды, эти горизонты нужно исследовать и оценить разными агрохимическими методами и критериями [20].

В кислых торфяных и минеральных горизонтах почв, как и рекомендуется, подвижные формы фосфора и калия экстрагировали 0,2N HCl. По агрохимическим критериям для торфяных почв [20] обеспеченность ими поверхностных органогенных горизонтов оказалась низкой (см. табл. 2). Схожим был уровень содержания этой формы  $P_2O_5$  и  $K_2O$  и в минеральных корнеобитаемых горизонтах (CR) почв. В то же время, в почвообразующих породах (Cg $\perp$ , CR(C)  $\perp$ ), имевших близкую к нейтральной реакцию среды (см. табл. 1), возможно, из-за наличия карбонатов, уровень концентрации фосфора подвижного в 0,2 N HCl оказался весьма высоким (см. табл. 2).

Подобное ранее отмечалось С.В. Губиным и А.В. Лупачевым [8, 9]. Они считали этот «феномен» высокого содержания подвижного фосфора при невысоком валовом содержании элемента в почве следствием биогенного его накопления растениями в период существования Берингии и последующей минерализации растительных остатков. Отчасти с этим можно согласиться. Однако метод Кирсанова не предназначен для определения содержания подвижных форм фосфора и калия в карбонатных почвах и породах. При использовании кислотной вытяжки разрушаются карбонаты и высвобождаются связанные ими химические элементы, что приводит к неверной агрохимической оценке почв по обеспеченности растений подвижными формами фосфора и калия, их реальной доступности растениям. Незнание или игнорирование ограничений использования агрохимических методов исследования почв может приводить к неверным суждениям об их плодородии. В данном случае об обеспеченности почв подвижными и доступными растениям формами фосфора и калия.

Для определения подвижного фосфора в карбонатных почвах и породах рекомендуется метод Мачигина (экстрагент 0,5M  $(NH_4)_2CO_3$ ). Его использование позволило установить в надмерзлотных (Cg $\perp$ ) горизонтах почв низкий уровень концентрации и обеспеченности растений подвижной формой фосфора и калия (см. табл. 2).

Приведенные результаты исследования состава и свойств тундровых почв Северной Якутии показали, что общее содержание в них изученных макро- и микроэлементов близко их уровню в аналогичных почвах Западной Сибири, Таймыра и Аляски. В почвах природный уровень содержания As и Be выше их кларка в почвах мира, ОДК и ПДК. Общий уровень валового содержания в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, B не предполагает их недостатка растениям, напротив, возможен некоторый избыток бора. Концентрации в почвах подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах указывают на возможный недостаток растениям P, K, Zn, а также на отсутствие почвенных предпосылок загрязнения тяжелыми металлами растительной продукции.

Концентрации и соотношения макро- и микроэлементов в органах и тканях растений критически важны для их жизни и продуктивности. От этого также зависит минеральная полноценность и безопасность растительной продукции для животных и человека. ЭХС разных видов растений, их органов и тканей варьирует в широких пределах. Он зависит от биологических особенностей растений, почвенных и природно-климатических условий их произрастания, воздействия естественных и антропогенных факторов, в том числе загрязнения твердыми частицами различного генезиса. Для агрохимической, биогеохимической, пищевой, лекарственной, гигиенической и иной оценки полноценности и безопасности ЭХС растений и их продукции нами использованы (табл. 3) соответствующие критерии и нормативы [1, 20, 24, 25].

Результаты определения содержания общей (A) и не растворимой в 10%-й соляной кислоте (a) золы, макро- и микроэлементов в пробах растений изученных биогеоценозов Северной Якутии (табл. 3) показали, что количества общей золы и химических элементов в растениях типичны для них, близки кларковым значениям для растений суши по Е.А. Романкевич [26].

Наибольшая зольность обнаружена в осоке (*Carex juncella*), накапливающей кремний, а наи-

## Элементный химический состав растений Северной Якутии и критерии его оценки

Table 3

## Elemental chemical composition of plants of the Northern Yakutia and criteria for its assessment

Растения, критерии оценки	% в а.с.в.										мг/кг а.с.в.										
	A	a	N	P	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Mo	B	Sr	As	Hg	Cd	Pb	Cr	Ni	Be
Разрез У-2-20, надпойменная терраса реки Яна в Индигирской низменности, Усть-Янский район Якутии																					
<i>Betula nana</i>	4,4	0,6	2,1	0,6	0,4	1,0	377	1703	406	6	2,0	0,1	81	55	0,1	0,07	0,19	5,0	0,4	6,4	0,04
<i>Salix pulchra</i>	5,4	0,4	2,2	0,5	0,7	1,3	303	1652	488	6	8,9	0,3	71	86	0,1	0,04	1,83	1,6	0,7	10,9	0,08
<i>Vaccinium uliginosum</i>	4,4	1,0	1,4	0,2	0,6	1,0	319	1417	44	5	0,6	0,2	91	29	0,1	0,05	0,20	1,5	0,8	2,5	0,05
<i>Ledum palustre</i>	2,5	0,4	1,7	0,1	0,3	0,6	189	690	30	4	0,3	0,1	34	20	0,1	0,04	0,09	0,9	0,7	2,5	0,03
<i>Carex juncella</i>	7,6	4,9	1,1	0,2	0,7	0,9	276	1368	81	3	0,4	0,3	10	27	0,2	0,03	0,03	2,3	0,8	2,4	0,06
Разрез У-3-20, надпойменная терраса реки Яна в Индигирской низменности, Усть-Янский район Якутии																					
<i>Larix sjaanderi</i>	3,2	1,2	1,7	0,3	0,2	0,5	326	1366	41	6	0,4	0,2	28	34	0,1	0,06	0,38	1,1	0,5	1,2	0,06
Смесь лишайников <i>Flavocetraria cuscullata</i> , <i>Cladonia arbuscula</i> , <i>Cladonia</i> <i>amaurocraea</i>	2,2	1,4	0,4	0,1	0,1	0,1	444	148	10	1	0,3	0,1	2	6	0,1	0,05	0,06	0,5	1,6	0,9	0,05
<i>Sanionia uncinata</i>	4,7	2,2	0,9	0,2	0,4	0,6	1476	526	93	6	7,1	0,2	9	35	0,1	0,15	0,06	181,0	2,8	14,1	0,12
Разрез 2-21-21 К-Кр., побережье Восточно-Сибирского моря, резерват «Курдигино-Крестовая», Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Calamagrostis holmii</i>	4,6	0,7	2,0	0,4	1,3	0,5	302	434	36	6	0,2	0,6	14	29	0,1	0,04	0,31	0,3	0,5	1,3	0,04
Разрез К-3-21, правый коренной берег р. Колыма в Колымской низменности, Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	3,0	0,4	1,2	0,1	0,4	0,6	273	1304	21	2	0,1	0,4	13	17	0,2	0,01	0,05	0,4	0,4	0,6	0,02
Разрез К-4-21, правый коренной берег р. Колыма в Колымской низменности, Нижнеколымский район Якутии																					
<i>Carex juncella</i>	7,9	4,8	1,6	0,3	1,0	1,1	139	481	19	2	0,2	6,3	6	76	0,1	0,02	0,18	0,3	0,6	1,1	0,06
Критерии оценки																					
Кларк в растениях суши [25]	5,3	–	1,9	0,2	1,1	1,5	200	240	50	10	0,5	0,5	25	40	0,1	0,01	0,04	2,5	1,8	2,0	0,10
Низкое (дефицит) [1, 19]	–	–	<2,0	<0,2	<1,5	<1,0	<10	<10	<20	<5	<0,2	<0,5	<1	–	–	–	–	–	–	–	–
Высокое (избыток) [1, 19]	–	–	>3,5	>0,3	>2,5	>1,5	>100	>100	>60	>20	>1,0	>3,0	>30	–	–	–	–	–	–	–	–
МДК* [24]	–	–	–	–	–	–	500	1000	500	100	20	10	300	–	3,5	–	–	–	–	–	–
МДУ* [1]	–	–	–	–	–	–	100	–	50	30	1,0	2,0	–	–	0,5	0,05	0,3	5,0	1,0	3,0	–
Норматив безопасности [1]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,0	0,05	0,3	5,0	–	–	–

\* МДК – максимально допустимая концентрация, МДУ – максимально-допустимый уровень.

\* МДК – maximum allowable concentration, МДУ – maximum allowable level.

меньшая – в лишайниках, что характерно для этих растений [23, 27]. Лишайникам свойственны низкие концентрации N, P, K, Ca, Zn, Cu, B, Sr и других химических элементов.

Наибольшие концентрации N и P выявлены в вейнике Хольма (*Calamagrostis holmii*) и листьях карликовой березки (*Betula nana*) и ивы красивой (*Salix pulchra*). Это говорит о них как о важных источниках растительного белка и фосфора для животных тундры и тайги Северной Якутии. Практически во всех растительных пробах концентрации калия и кальция оказались ниже их кларка в растениях суши (см. табл. 3). Это косвенно указывает на возможный их недостаток в растениях и далее в трофической цепи, а также подтверждает отмеченное выше низкое содержание подвижного калия в почвах (см. табл. 2).

Все растения имели высокое содержание Fe и Mn. В листьях *Vaccinium vitis-idaea*, *Betula nana*, *Salix pulchra*, хвое *Larix cajanderi* концентрации Mn превышали максимально допустимый биогеохимический уровень (МДУ) его содержания в кормовых растениях (см. табл. 3). Эти данные подтверждают заключение об отсутствии в Северной Якутии биогеохимических предпосылок для дефицита Fe и Mn в пастбищных растительных кормах и трофической цепи в целом [2]. В то же время, избыток Fe и Mn грозит снижением доступности растениям и животным других химических элементов [1], прежде всего P, Cu, Zn.

В большинстве растений концентрации цинка находились в пределах нормального (пониженного – высокого) агрохимического и биогеохимического уровней. Только в лишайниках содержание Zn было очень низким, а в листьях *Betula nana*, *Salix pulchra* напротив, очень высоким, близким к максимально допустимому количеству (МДК) в грубых кормах животных (см. табл. 3). Листьям кустарничков арктической зоны в целом характерны высокие концентрации Fe, Mn, Zn, Co, Ni, Cd [15, 28, 29], что, вероятно, обусловлено биологической потребностью в них растений. Предрасположенность арктических ив к аккумуляции кадмия [28] может быть причиной его накопления в организмах животных и птиц тундры [29].

Во всех видах растений уровень содержания меди был средним, а в лишайниках и *Carex juncella*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea* – низким (см. табл. 3). Результаты анализа растений не подтвердили приведенные выше данные почвенной диагностики о высокой обеспеченности растений подвижной формой меди (см. табл. 2).

Из этого следует, что агрохимические критерии оценки концентрации в почвах подвижной формы меди не всегда дают достоверную информацию об обеспеченности ею растений, о возможной транслокации меди из почвы в растения, а далее в другие звенья биогеохимической цепи.

Концентрации кобальта во многих растениях находились в пределах агрохимической и биогеохимической норм, подтверждая данные почвенной диагностики о хорошей обеспеченности растений этим микроэлементом.

Уровень содержания бора в изученных растениях был нормальным и даже высоким, что подтвердило заключение о достаточном количестве бора в трофической цепи Северной Якутии [2, 3]. Обнаруженные избыточные концентрации бора в листьях *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*, *Salix pulchra* доказывают правомерность выделения здесь борной биогеохимической провинции [4].

С позиций зоогигиенической безопасности и минеральной полноценности элементного химического состава растений как грубых кормов для сельскохозяйственных копытных животных (см. табл. 3) изученным растительным кормам характерно отсутствие превышения норм безопасности по As и Pb, наличие избытка Fe, Mn и недостатка Cu, Mo. В изученных растениях концентрации Hg, Cd, Pb варьировали в широких пределах – от безопасных до потенциально опасных, но в целом содержание в них As, Hg, Cd, Pb типично для растительности тундры и, возможно, неопасно для ее животных.

Выявленные существенные различия концентраций Hg, Cd, Pb, а также Fe, Mn, Zn, Co, B, Sr, Cr, Ni в разных видах растений мы объясняем влиянием на них биогенных и абиогенных факторов. К первым относятся биологические особенности растений в потребности, поглощении и аккумуляции химических элементов, ко вторым природная специфика почвенных условий произрастания растений и антропогенное воздействие.

Биологическая специфика растений *Betula nana*, *Salix pulchra*, *Vaccinium uliginosum*, *Carex juncella*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Sanionia uncinata* к накоплению высоких концентраций макро- и микроэлементов отмечена многими учеными [15, 16, 23, 27, 28, 29]. В то же время, причиной высоких концентраций Fe, Mn, Zn, Co, Hg, Pb, Cr, Ni, Be в *Sanionia uncinata* может быть попадание в пробу этого мха минеральных частиц железомарганцевых конкреций, акцессорных минералов или техногенных ве-

ществ, обогащенных этими химическими элементами. На возможное влияние данного абиогенного фактора на ЭХС растений указывает существенная (около 50 %) доля не растворимой в 10%-й соляной кислоте части золы (а) в общей зольности пробы (А) (см. табл. 3). Нерастворимая часть зольных веществ в составе общей золы растительных проб была велика и в *Carex juncella*, но в осоке она не оказала существенно-го влияния на концентрацию Co, Hg, Pb, Cr, Ni и Be. Возможно, это обусловлено тем, что общая зольность и нерастворимая часть золы в *Carex juncella* формируется за счет Si, уровень концентрации которого в осоках на порядок выше, чем в других видах растений.

### Заключение

Впервые выполненное изучение и комплексная оценка элементного химического состава почв и растений биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии позволяют сделать следующее заключение.

В естественных биогеоценозах Северной Якутии почвы и растения имеют региональные особенности содержания химических элементов, их агрохимического, биогеохимического и гигиенического статуса.

Природной геохимической спецификой почв приморских низменностей Якутии является высокое валовое содержание As и Be, превышающее их кларки в почвах мира, ОДК и ПДК, возрастающее сверху вниз профилей почв и с юга на север приморских низменностей.

По уровню содержания Mn, Zn, Co, Pb, V, Sr почвы Северной Якутии близки аналогичным почвам Западной Сибири, Таймыра и Аляски.

Общее количество в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo, Sr по агрохимическим и биогеохимическим нормативам находится в пределах нормального уровня содержания для жизни растений и животных, а бора превышает его. Гигиенически нормируемое содержание Mn, Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Hg, V, Sb в почвах ниже значений ПДК и ОДК.

Генетически обусловленные различия состава и свойств органогенных и минеральных горизонтов почв Северной Якутии предопределили их различие по валовому содержанию и концентрации подвижных форм химических элементов, подвижности и доступности последних растениям.

Поскольку реакция среды и содержание органического вещества в разных генетических горизонтах почв могут существенно различаться,

для определения и оценки содержания подвижных форм фосфора и калия в контрастных по составу и свойствам горизонтах следует использовать соответствующие им агрохимические методы и нормативы. Игнорирование рекомендаций по их использованию может приводить к неверным выводам о подвижности и доступности этих элементов растениям, сделанным на их основе прогнозам.

Во всех горизонтах почв концентрации подвижных в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 форм Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Ni, Pb не превышали значений ПДК. По агрохимическим нормативам в органогенных горизонтах почв концентрации этой формы Mn, Zn, Co были высоки, а в минеральных горизонтах концентрации Mn и Co были в пределах нормы, а Zn – ниже ее.

Уровень валового содержания в почвах Mn, Zn, Cu, Co, Mo и В не предполагает их недостатка в растениях, напротив, возможен некоторый избыток бора как в растениях, так и животных, их употребляющих.

Концентрации в почвах Северной Якутии подвижных форм S, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Cr, Ni, Pb указывают на возможный недостаток для растений P, K, Zn, отсутствие почвенных предпосылок загрязнения растительной продукции тяжелыми металлами – Mn, Zn, Cu, Co, Cd, Cr, Cr, Ni, Pb.

По сравнению с кларками элементов в растительности суши, агрохимически и биогеохимически нормального их содержания, в растениях Северной Якутии низки концентрации K, Ca, Cu, Mo, Pb, Cr, Be, и высоки – Fe, Mn, Hg, Cd. Высокое содержание As и Be в почвах не повлияло на их количество в растениях.

Растительности биогеоценозов Северной Якутии характерна высокая концентрация Fe, Mn, B, Hg, Cd, Ni. Аномально высокой концентрацией Mn, Zn, Co, Cd, Ni отличаются листья *Betula nana*, *Salix pulchra*. Они же наиболее богаты N, P. Лишайникам свойственны низкие концентрации всех изученных химических элементов.

Элементный химический состав растительной продукции биогеоценозов приморских низменностей Северной Якутии, служащей кормовой базой живущих на ее территории животных, предполагает природный дефицит в биогеохимической цепи K, Ca, Cu, Mo, а также Zn и P, из-за избытка в ней Fe и Mn. Помимо последних возможен природный избыток бора и повышенный уровень концентрации Cd и Ni.

## Список литературы / References

1. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф. *Геохимическая экология животных*. М.: Наука; 2008. 315 с.  
[Yermakov V.V., Tyutikov S.F. *Geochemical ecology of animals*. M.: Nauka; 2008. 315 p. (In Russ.)]
2. Егоров А.Д., Григорьева Д.В., Курилюк Т.Т., Сазонов Н.Н. *Микроэлементы в почвах и лугопастбищных растениях мерзлотных ландшафтов Якутии*. Якутск; 1970. 288 с.  
[Yegorov A.D., Grigoreva D.V., Kurilyuk T.T., Sazonov N.N. *Trace elements in soils and grassland plants of permafrost landscapes of Yakutia*. Yakutsk; 1970. 288 p. (In Russ.)]
3. Саввинов Д.Д., Сазонов Н.Н. *Микроэлементы в северных экосистемах: на примере Республики Саха (Якутия)*. Новосибирск: Наука; 2006. 208 с.  
[Savvinov D.D., Sazonov N.N. *Trace elements in northern ecosystems: on the example of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Novosibirsk: Nauka; 2006. 208 p. (In Russ.)]
4. Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах и растениях Центральной Якутии. *Геохимия*. 1971; 4: 463–476.  
[Andrianova G.A. Trace elements in soils and plants of Central Yakutia. *Geokhimiya*. 1971; 4: 463–476. (In Russ.)]
5. Егорова Г.А. Оценка элементного статуса взрослого населения, проживающего в разных медико-географических зонах Республики Саха (Якутия). *Экология человека*. 2007;1: 55–59.  
[Egorova G. A. Evaluation of the elemental status of the adult population living in different medical and geographical zones of the Republic of Sakha (Yakutia). *Ecologia cheloveka*. 2007;1:55-59. (In Russ.)]
6. Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В. *Почвы Северной Якутии*. Новосибирск: Наука; 1979. 304 с.  
[Elovskaya L.G., Petrova E.I., Teterina L.V. *Soils of Northern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1979; 304 p. (In Russ.)]
7. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы суглинистых водоразделов приморских тундр Севера Якутии: условия и процессы формирования. *Почвоведение*. 2017; 2:147–157. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>  
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soils of loamy watersheds of the coastal tundras of the North of Yakutia: conditions and processes of formation. *Pochvovedenie*. 2017;2:147–157. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
8. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвы и отложения озерно-аласных котловин тундр Колымской низменности. *Почвоведение*. 2020;7:775–790. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>  
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soils and deposits of lacustrine-alas basins in the tundra of the Kolyma Lowland. *Pochvovedenie*. 2020;7:775–790. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020046>
9. Губин С.В., Лупачев А.В. Почвообразование в тундровой зоне приморских низменностей северо-востока Сибири. *Почвоведение*. 2020;10: 1182–1191. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100081>  
[Gubin S.V., Lupachev A.V. Soil formation in the tundra zone of the coastal lowlands of northeastern Siberia. *Pochvovedenie*. 2020;10:1182–1191. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100081>
10. Десяткин Р.В., Иванова А.З., Оконешникова М.В., Десяткин А.Р., Филиппов Н.В. Почвы криогенных форм микрорельефа тундровой и лесотундровой зон Северо-Восточной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):98–108. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>.  
[Desyatkin R.V., Ivanova A.Z., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R., Filippov N.V. Soils of cryogenic forms of the microrelief of the tundra and forest-tundra zones of North-Eastern Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1):98–108. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-98-108>
11. Десяткин Р.В. *Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны*. Новосибирск: Наука; 2008. 324 с.  
[Desyatkin R.V. *Soil formation in thermokarst depressions – alases in the permafrost zone*. Novosibirsk: Nauka; 2008. 324 p. (In Russ.)]
12. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004. 341 с.  
[Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena; 2004. 341 p. (In Russ.)]
13. IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
14. Яковлева М.В., Козина Е.А. Растения, используемые в кормлении оленей. *Сборник научных трудов Ставропольского научно-исследовательского института животноводства и кормопроизводства*. 2014;2(7):654–657.  
[Yakovleva M.V., Kozina E.A. Plants used in reindeer feeding. *Collection of scientific works of the Stavropol Research Institute of Animal Husbandry and Forage Production*. 2014;2(7):654–657. (In Russ.)]
15. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках Севера Западной Сибири. *Почвоведение*. 2019;4:422–439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>  
[Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the North of Western Siberia. *Pochvovedenie*. 2019;4:422–439. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
16. Сысо А.И., Колпашников Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиromля Т.И. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра. *Сибирский экологический журнал*. 2014;6:855–862.  
[Syso A.I., Kolpashchikov L.A., Ermolov Yu.V., Cherevko A.S., Siromlya T.I. Elemental chemical composition of soils and plants of the Western Taymyr. *Siberian Ecological Journal*. 2014;6:855–862. (In Russ.)]

tion of soils and plants of Western Taimyr. *Siberian Ecological Journal*. 2014;6:855–862. (In Russ.)]

17. Crock J.G., Gough L.P., Wanty R.B., Day W.C., Wang B., Gamble B.M., Henning M., Brown Z.A., Meier A.L. *Regional Geochemical Results from the Analyses of Rock, Water, Soil, Stream Sediments, and Vegetation Samples—Fotymile River Watershed, East-Central, Alaska*. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-33. 1999; 83 p. <https://doi.org/10.3133/ofr9933>

18. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4<sup>th</sup> edition. Boca-Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2010; 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>

19. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015;2:7–17.

[Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. «*Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*». 2015; 2:7–17. (In Russ.)]

20. *Методические указания по агрохимическому обследованию и картографированию почв на содержание микроэлементов*. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; 1976. 80 с.

[*Guidelines for agrochemical survey and mapping of soils for the content of trace elements*. М.: Dokuchaev Soil Institute; 1976. (In Russ.)]

21. *Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения*. М.: ФГНУ «Росинформагротех»; 2003. 240 с.

[*Guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land*. М.: FGNU “Rosinformagrotech”; 2003. (In Russ.)]

22. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания*. Утверждены Постановлением Главного гос. сан. врача РФ № 2 от 28.01.2021. М.: 2021.

[*Sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Approved by the Decree of the Chief State Doctor of the Russian Federation No. 2 dt. 01/28/2021. М.: 2021; (In Russ.)]

23. Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды. *Вестник Санкт-Петербур-*

*бургского университета. Серия 7. Геоология. География*. 2014;1:79–94.

[Opekunova M.G., Gizetdinova M.Yu. The use of lichens as bioindicators of environmental pollution. *Vestnik of Saint Petersburg University. Geology. Geography*. 2014;1:79–94. (In Russ.)]

24. Церлинг В.В. *Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник*. М.: Агропромиздат; 1990. 235 с.

[Zerling V.V. *Diagnostics of nutrition of agricultural crops: Handbook*. Moscow: Agropromizdat; 1990. (In Russ.)]

25. Narwal R.P., Dahiya R.R., Malik R.S. Pollutant elements in soil-plant-animal system in India and future thrust areas. *Eur. Chem. Bull.* 2013;2(1):38–45.

26. Романкевич Е.А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы). *Геохимия*. 1988;2: 292–306.

[Romankevich E.A. Living matter of the Earth (biogeochemical aspects of the problem). *Geochemistry*. 1988;2: 292–306. (In Russ.)]

27. Елькина Г.Я., Денева С.В., Лаптева Е.М. Тяжелые металлы в системе почва-растение в биогеоценозах Большеземельской тундры. *Теоретическая и прикладная экология*. 2019;3:41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>

[Elkina G.Ya., Deneva S.V., Lapteva E.M. Heavy metals in the soil-plant system in biogeocenoses of the Bolshezemelskaya tundra. *Theoretical and applied ecology*. 2019;3:41–47. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>

28. Gough L.R., Sanzolone R.F., Crock J.G., Foster A.L., Ager C.M., Gent C.A. *Biogeochemical and biochemical pathway investigations of Cadmium in subarctic ecosystems using a Cadmium Accumulator Species (willow) USGS Numbered Series*. Bulletin 2191-4. U.S. Geological Survey; 2010. <https://doi.org/10.3133/b21914>

29. Ермолов Ю.В., Лебедева М.А., Бондарь М.Г., Колпачиков Л.А., Черевко А.С., Смоленцев Н.Б. Особенности аккумуляции химических элементов в биогеохимической пищевой цепи северной части Норильского плато. *Геохимия*. 2020;65(5):499–510. <https://doi.org/10.31857/S0016752520040032>

[Ermolov Yu.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolpashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolentsev N.B. Features of the accumulation of chemical elements in the biogeochemical food chain of the northern part of the Norilsk Plateau. *Geochemistry*. 2020;65(5):499–510. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0016752520040032>

#### Об авторах

СЫСО Александр Иванович, доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии почв, Author ID: 6507085911, Researcher ID: I-4231-2016, <https://orcid.org/0000-0003-4954-4052>, e-mail: [syso@issa-siberia.ru](mailto:syso@issa-siberia.ru)

ДЕСЯТКИН Роман Васильевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Author ID: 6507832825, Researcher ID: K-5281-2018, <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, e-mail: [rvdes@ibpc.ysn.ru](mailto:rvdes@ibpc.ysn.ru)

НИКОЛАЕВА Майя Христофоровна, младший научный сотрудник, Author ID: 34875605400, Researcher ID: N-6732-2019, <https://orcid.org/0000-0002-0160-2295>, e-mail: [mayan34@yandex.ru](mailto:mayan34@yandex.ru)

ИВАНОВА Александра Зуевна, младший научный сотрудник, Researcher ID: J-6741-2018, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: [madalexia@mail.ru](mailto:madalexia@mail.ru)

ФИЛИППОВ Николай Васильевич, инженер-исследователь, Author ID: 57202088215, Researcher ID: J-6803-2018, <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, e-mail: [finiva88@mail.ru](mailto:finiva88@mail.ru)

ДЕСЯТКИН Алексей Романович, старший научный сотрудник, PhD, Scopus ID: 160215-000377, Researcher ID: G-1918-2016, <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, e-mail: [desyatkinar@rambler.ru](mailto:desyatkinar@rambler.ru)

ХУДЯЕВ Сергей Анатольевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Scopus ID: 55553643800, Researcher ID: S-3872-2017, <https://orcid.org/0000-0002-0431-0757>, e-mail: [khudayev@issa-siberia.ru](mailto:khudayev@issa-siberia.ru)

#### *About the authors*

SUSO, Alexander Ivanovych, Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory, Author ID: 6507085911, Researcher ID: I-4231-2016, <https://orcid.org/0000-0003-4954-4052>, e-mail: [sysol@issa-siberia.ru](mailto:sysol@issa-siberia.ru)

DESYATKIN, Roman Vasilievich, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Author ID: 6507832825, Researcher ID: K-5281-2018, <https://orcid.org/0000-0002-1289-5433>, e-mail: [rvdes@ibpc.ysn.ru](mailto:rvdes@ibpc.ysn.ru)

NIKOLAEVA, Maya Christophorovna, Junior Researcher, Author ID: 34875605400, Researcher ID: N-6732-2019, e-mail: [mayan34@yandex.ru](mailto:mayan34@yandex.ru)

IVANOVA, Alexandra Zuevna, Junior Researcher, Researcher ID: J-6741-2018, <https://orcid.org/0000-0002-8501-6807>, e-mail: [madalexia@mail.ru](mailto:madalexia@mail.ru)

FILIPPOV, Nikolai Vasilievich, Research Engineer, Author ID: 57202088215, Researcher ID: J-6803-2018, <https://orcid.org/0000-0003-0463-3123>, e-mail: [finiva88@mail.ru](mailto:finiva88@mail.ru)

DESYATKIN, Alexey Romanovich, PhD, Senior Researcher, Author ID: 160215-000377, Researcher ID: G-1918-2016, <https://orcid.org/0000-0002-9597-999X>, e-mail: [desyatkinar@rambler.ru](mailto:desyatkinar@rambler.ru)

KHUDYAEV, Sergey Vasilievich, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Author ID: 55553643800, Researcher ID: S-3872-2017, <https://orcid.org/0000-0002-0431-0757>, e-mail: [khudayev@issa-siberia.ru](mailto:khudayev@issa-siberia.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 14.11.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 17.01.2023*

*Принята к публикации / Accepted 14.02.2023*