

УДК 631.416:553.43(571.55)

## СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ НА ТЕРРИТОРИИ УДОКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ

© 2021 г. В. П. Макаров<sup>1,\*</sup>, Н. Ю. Михеева<sup>1</sup>, С. В. Борзенко<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
672014 Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

\*E-mail: vm2853@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 27.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Рассмотрены особенности распределения подвижных форм химических элементов в различных типах почв на территории Удоканского месторождения меди, в Каларском р-не Забайкальского края. Целью работы было выявление особенностей распределения химических элементов в почвах района Удоканского месторождения меди. Исследование почвенного покрова проведено в июне и августе 2011 г. Содержание химических элементов определяли в горно-тундровых и горно-таежных почвах. Было заложено 36 почвенных разрезов, проведено морфологическое описание разрезов. Анализ элементного состава по типам почв проведен на глубине до 50 см. Определили в почве содержание 21 микроэлемента. Среднее содержание подвижных элементов в почвах на территории месторождения меди находилось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be. Исследованные типы почв отличались содержанием химических элементов, обнаружена корреляционная связь содержания элементов с высотой расположения места отбора проб над уровнем моря и между собой. Полученные результаты могут быть использованы для исследования изменения качества среды в районе исследования. В целом концентрация химических элементов в почвах была значительно меньше их среднего содержания в земной коре.

*Ключевые слова:* химический состав почв, Удоканское медное месторождение, почвы, микроэлементы.

DOI: 10.31857/S0002188121090088

### ВВЕДЕНИЕ

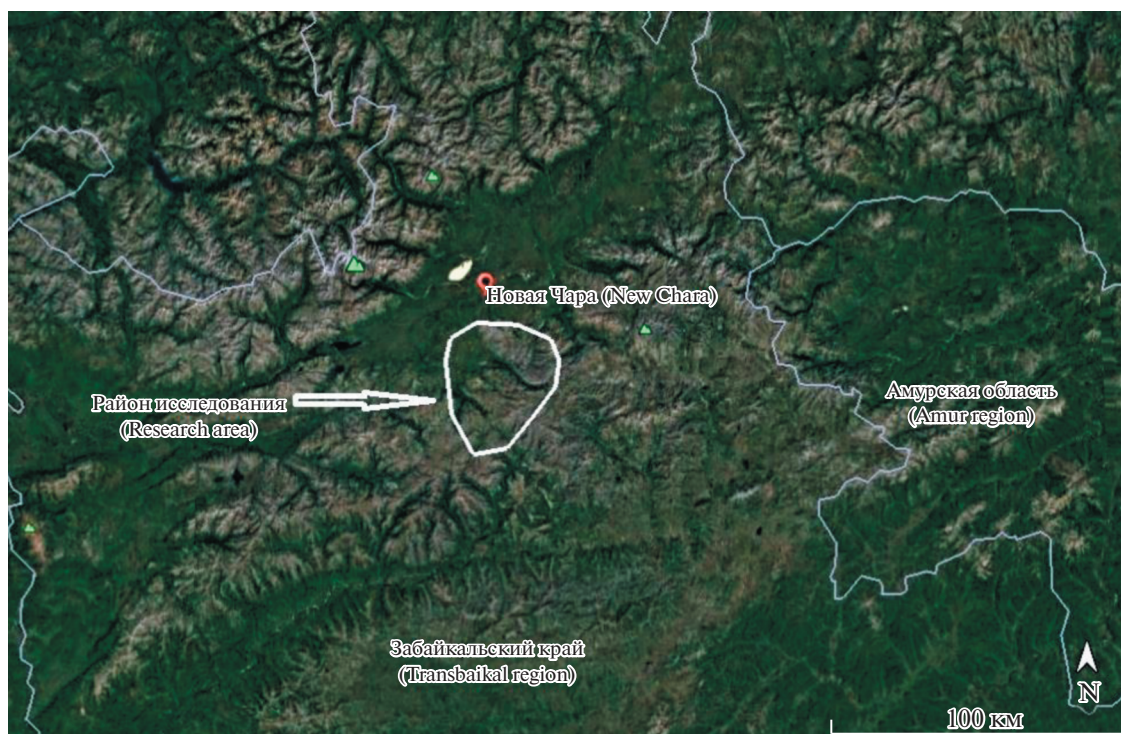
Район исследования находится на территории Удоканского медного месторождения, в Каларском р-не Забайкальского края (рис. 1). Руды Удоканского месторождения — комплексные, кроме меди в них присутствуют Mo, Ni, Co, Zn, Pb, Bi, Hg, As, Ag, Au, Pt и Pd. Основная форма элементов в рудах — собственные минералы [1]. Геохимической особенностью месторождения является относительно низкое содержание большинства элементов. Ванадий, серебро, хром отмечены в количествах, близких к кларку. В меньших количествах встречаются марганец, титан, свинец, цинк, кобальт, никель, бериллий. Превышают кларки висмут и золото [2].

Отличительной особенностью территории является также сильно расчлененный высокогорный рельеф и наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород. Характер распространения многолетнемерзлых пород существенно сказыва-

ется на химическом составе подземных и поверхностных вод региона. По химическому составу воды чаще гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и натриевые с минерализацией до 100 мг/л и рН до 6.8 с повышенными содержаниями таких микроэлементов как медь, никель, железо, марганец [3].

В районе исследования различают 2 основных типа почв — горно-тундровые и горно-таежные. Гранулометрический состав почв — пески, супеси и легкие суглинки. Реакция почвенного раствора (рН<sub>KCl</sub>) — от сильноокислой (3.95) до нейтральной (6.35). По степени гидролитической кислотности почвы — от нейтральных (1.21 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (75.4 ммоль/100 г почвы).

В настоящее время проблема техногенной трансформации окружающей среды приобретает особую актуальность в северных районах России, где при активном промышленном освоении существенно увеличивается геохимическая нагрузка



**Рис. 1.** Расположение района исследования почв на территории Удоканского месторождения меди Забайкальского края.

ка на живую природу, атмосферный воздух и земную поверхность, происходят интенсивные процессы перераспределения и трансформации химических элементов. Об этом свидетельствуют резкие изменения в компонентах экосистем в районах развития ведущих отраслей горнодобывающей промышленности.

Освоение Удоканского месторождения будет вести открытым, карьерным способом. Реализация планов по добыче и переработке медной руды может привести к значительному загрязнению прилегающих территорий вследствие образования карьеров, отвалов, хвостохранилищ с последующим возникновением эрозионных очагов и новых миграционных геохимических потоков, характеризующихся повышенными концентрациями химических элементов.

В районе хребта Удокан произрастает множество растений, которые используют в качестве сырьевых ресурсов. Обширные площади занимают лиственничные леса, кедрово-стланиковые, ерниковые и лишайниковые сообщества. В лесах произрастает ряд ценных пищевых и лекарственных растений. Растительные сообщества, в особенности лишайниковые, используют в качестве оленьих пастбищ. Поэтому проблема мониторинга окружающей среды в этих условиях осо-

бенно актуальна. Знание элементного состава почвы позволяет осуществлять контроль и прогноз изменений в среде обитания организмов. Кроме того, проведенные исследования дополняют информацию о свойствах почв в условиях высокогорья и вечной мерзлоты в одном из мало доступных регионов России.

Цель работы – исследование концентрации и особенностей распределения ряда химических элементов в почве до производственной стадии разработки месторождений полезных ископаемых. Такие исследования в районе ранее не проводили.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование почвенного покрова проведено в июне и августе 2011 г. Содержание химических элементов определяли в горно-тундровых и горно-таежных почвах. Было заложено 36 почвенных разрезов, проведено морфологическое описание разрезов, отобраны почвенные пробы из горизонтов А и В согласно инструкции по почвенным обследованиям [4], ГОСТ Р 58595-2019 и ГОСТ 17.4.4.02-2017. Глубина отбора почвенных образцов зависела от мощности почвы. Глубина слоя А была до 25 см, слоя В – до 50 см. В ряде почвенных разрезов отбор почвы производили из

слоя АВ на глубину до 50 см. Анализ элементного состава типов почв проведен путем объединения слоев АВ.

Для оценки уровня плодородия почв по ГОСТ 17.4.3.02-85 определяли следующие показатели: содержание органического вещества, подвижных фосфора и калия, общего азота, обменных кальция, магния и натрия, величины  $pH_{KCl}$  и  $pH_{H_2O}$ , сумму поглощенных оснований, гидролитическую кислотность, емкость катионного обмена, основные катионы и анионы (включая  $CO_3^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$ , в моль/100 г почвы), гранулометрический состав.

Выполнено определение в почвенных образцах подвижных форм микроэлементов: Ti, V, As, Cd, Cu, Pb, Mo, Hg, Ni, Zn, Ba, Cr, Mn, Co, Ag, Sr, Sb, Fe, Al, Se, Be [4]. Определение тяжелых металлов и металлоидов в почве выполнено методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности почвообразования таежных почв Забайкалья впервые рассмотрены в работах Ногинской, исследовавшей левобережную часть Витимского плоскогорья и юг бурятской части Станового нагорья. Наиболее существенным явилось выделение автором типа горно-таежных почв [5].

Позднее эти почвы были описаны Преображенским при физико-географических исследованиях северных районов Читинской обл. [6]. При рекогносцировочном обследовании на основе анализа морфологической структуры почвенных разрезов, руководствуясь в основном схемой Ногинской, им были выделены на территории изученного района следующие группы почв: горно-таежные и горно-тундровые.

В 1978 г. сотрудниками Читинского филиала Института "ВостСибНИИГипрозем" была составлена "Почвенная карта" Читинской обл. (Забайкальского края) масштаба 1:600 000, по результатам которой на территории Каларского р-на были выделены контуры сочетаний горно-таежных торфянисто-мерзлотных, горно-таежных обычных, горно-таежных оподзоленных и горно-тундровых почв.

Почвообразующими породами описываемой территории являются элювиально-делювиальные отложения. По долинам рек и ручьев почвообразование идет на древнеаллювиальных и современных аллювиальных рыхлых наносах. В долинах рек и их притоках, на аллювиальных и делювиальных

отложениях залегают горно-таежные аллювиальные, горно-таежные торфянисто-мерзлотные и торфянисто-мерзлотные почвы. В полосе высот до 1400 м на плоских участках речных незаливаемых террас под лиственничными лесами на элювиально-делювиальных отложениях формируются горно-таежные почвы. На склонах средней крутизны подгольцового пояса на высотах 1600–1700 м основной фон представлен горно-таежными обычными почвами. Большие площади по крутым безлесным склонам и вершинам хребтовых поднятий на высотах 1700–1800 м занимают горно-тундровые почвы.

В результате проведенных исследований на рассматриваемой территории выделены следующие типы почв: 1 – горно-тундровые, 2 – горно-таежные.

1. Горно-тундровые почвы широко распространены в гольцовом поясе, выше 1700–1800 м, где занимают большие площади по крутым безлесным склонам и вершинам хребтовых поднятий. Профиль этих почв очень укорочен. Под тонким лишайниковым покровом залегает горизонт слаборазложившегося мха, с которого начинается сильно хрящеватая супесь темно-коричневых тонов. В профиле очень много щебня, обломков коренных пород.

По данным химических анализов, верхний горизонт горно-тундровой почвы характеризуется содержанием: органического вещества – от низкого (2.68%) до очень высокого (12.7%), общего азота – от очень низкого (0.06%) до высокого (0.62%), подвижного фосфора – очень низкое (1.2–7.8 мг/кг), подвижного калия – от низкого (35.1 мг/кг) до среднего (61.0 мг/кг), обменного кальция (0.75–1.0 ммоль/100 г почвы) и обменного магния (0.05–0.13 ммоль/100 г почвы) – очень низкое, реакция почвенного раствора ( $pH_{KCl}$ ) – от сильноокислой (4.16) до среднекислой (4.95 ед.). Сумма поглощенных оснований составляла 0.5–6.4 ммоль/100 г почвы с преобладанием обменного кальция. По степени гидролитической кислотности почвы были от среднекислых (4.71 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (13.6 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе горно-тундровых почв преобладали фракции легких и средних суглинков.

2. Горно-таежные почвы формируются на склонах средней крутизны под лиственничными лесами с подлеском из березы, стланика с небольшим мохово-лишайниковым покровом на элювиально-делювиальных отложениях. Мерзлота залегает обычно на глубине 0.5–0.6 м. Для них характерно наличие небольшой торфянистой под-

стилки (2–5 см) из слаборазложившихся мхов. На исследованной территории выделены следующие подтипы горно-таежных почв: горно-таежные аллювиальные, горно-таежные обычные, горно-таежные торфянисто-мерзлотные и торфянисто-мерзлотные почвы.

2а. Горно-таежные обычные почвы формируются на южных склонах различной крутизны, в долинах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит под листовничными лесами с подлеском из березы, стланика с небольшим мохово-лишайниковым покровом на аллювиально-делювиальных отложениях. Мерзлота залегает обычно на глубине 0.5–0.6 м. Для почв характерно наличие небольшой торфянистой подстилки (2–5 см) из слаборазложившихся мхов.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт горно-таежной обычной почвы характеризуется содержанием: органического вещества – от очень низкого (1.32%) до очень высокого (10.2%), общего азота – от очень низкого (0.05%) до повышенного (0.35%), подвижного фосфора – от очень низкого (1.24 мг/кг) до очень высокого (202 мг/кг), подвижного калия – от низкого (35.4 мг/кг) до очень высокого (255 мг/кг), обменного кальция – от очень низкого (0.10 ммоль/100 г почвы) до среднего (5.80 ммоль/100 г почвы), обменного магния – от очень низкого (0.05 ммоль/100 г почвы) до низкого (0.91 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора ( $pH_{KCl}$ ) – от сильноокислой (4.22) до нейтральной (6.35), сумма поглощенных оснований составляла 0.5–16.8 ммоль/100 г почвы. По степени гидролитической кислотности преобладала реакция среды от близкой к нейтральной (2.57 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислой (11.0 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе преобладающими фракциями горно-таежных обычных почв были песок, супесь и легкий суглинок.

2б. Горно-таежные торфянисто-мерзлотные почвы формируются на плоских или полого наклоненных участках, на склонах северной экспозиции, на высотах от 1000 до 1300–1400 м, в надпойменных террасах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит под разреженными лесами с подлеском из березы, с участием кустарничкового покрова и обилием мхов. Характерным признаком для этой почвы является торфянистый горизонт мощностью от 10–12 до 25 см.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт горно-таежной торфянисто-мерзлотной почвы характеризуется содержанием: органического вещества – от низкого (2.40%) до

очень высокого (12.4%), общего азота – от очень низкого (0.11%) до повышенного (0.41%), подвижного фосфора – очень низким (1.10–2.2 мг/кг), подвижного калия – от низкого (37.2 мг/кг) до повышенного (118.5 мг/кг), обменного кальция – от очень низкого (1.05 ммоль/100 г почвы) до низкого (4.05 ммоль/100 г почвы), обменного магния – от очень низкого (0.02 ммоль/100 г почвы) до среднего (1.26 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора ( $pH_{KCl}$ ) – от сильноокислой (4.32) до близкой к нейтральной (5.81). Сумма поглощенных оснований составляет 0.8–21.6 ммоль/100 г почвы. По степени гидролитической кислотности почвы относятся к группам от слабоокислых (4.05 ммоль/100 г почвы) до очень сильноокислых (15.8 ммоль/100 г почвы). В гранулометрическом составе горно-таежных торфянисто-мерзлотных почв преобладают фракции песка, супеси и легкого суглинка.

2в. Торфянисто-мерзлотные почвы ерников формируются на участках с неглубоким залеганием мерзлоты на пролювиальном материале, в долинах рек Нирунгнакан, Нижний Ингамакит с листовничными ерниками. Характерным признаком этой почвы является торфянистый горизонт (мощностью 10–12 см) с хорошо разложившимся торфом.

По данным физико-химических анализов, верхний горизонт торфянисто-мерзлотной почвы характеризуется содержанием: подвижного фосфора – от очень низкого (0.34 мг/кг) до низкого (34.0 мг/кг), подвижного калия – от среднего (56.0 мг/кг) до очень высокого (396 мг/кг), массовой долей оксида кальция – очень низкой (0.11–0.16%), массовой долей оксида магния – очень низкой (0.10–0.30%). Реакция почвенного раствора ( $pH_{KCl}$ ) – от очень кислой (4.01) до среднекислой (4.95), емкость катионного обмена составляет 34.0–76.0 мг-экв/100 г почвы. Почвы по степени гидролитической кислотности – очень сильноокислые (35.1–75.4 ммоль/100 г почвы).

2г. Горно-таежные аллювиальные почвы формируются в поймах р. Чара, Намингнакан, Наминга, Нижний Ингамакит, Сангиях и ручья Эмегачи под листовничными лесами на аллювиальных и делювиальных отложениях. Для этих почв характерна невыявленность профиля, наличие погребенных аллювием горизонтов.

Верхний горизонт горно-таежной аллювиальной почвы характеризуется содержанием: органического вещества – от очень низкого (0.69%) до очень высокого (24.7%), общего азота – от очень низкого (0.02%) до среднего (0.27%), подвижного фосфора – от низкого (20.4 мг/кг) до

высокого (161 мг/кг), подвижного калия — от среднего (48.9 мг/кг) до очень высокого (283 мг/кг), обменного кальция — от очень низкого (0.70 ммоль/100 г почвы) до повышенного (10.35 ммоль/100 г почвы), обменного магния — от очень низкого (0.05 ммоль/100 г почвы) до среднего (2.24 ммоль/100 г почвы). Реакция почвенного раствора — от очень сильнокислой (3.95) до близкой к нейтральной (5.63). Сумма поглощенных оснований составляет 3.4–38.0 ммоль/100 г почвы) с преобладанием обменного кальция. Почвы по степени гидролитической кислотности входят в группы от нейтральных (1.20 ммоль/100 г почвы) до очень сильнокислых (17.3 ммоль/100 г почвы). Преобладающими фракциями в горно-таежной аллювиальной почве являются песок, супесь и легкий суглинок.

Средние содержания подвижных форм химических элементов в почвах хребта Удокан в порядке убывания располагаются следующим образом: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be.

Железо — один из главных компонентов литосферы и составляет приблизительно 5% ее массы, концентрируясь преимущественно в основных сериях магматических пород. Кларк железа в почвах равен 3.8%. Как правило, окислительные и щелочные условия среды способствуют осаждению железа, а кислые и восстановительные — растворению его соединений. Количество растворимого железа составляет незначительную часть от общего его количества. В почвенных водах при обычных уровнях pH количество его составляет от 30 до 550, а в очень кислых — 2000 мкг/л. Поэтому кислые почвы более обогащены железом, чем нейтральные и щелочные [7].

В районе исследования для железа почв было характерно максимальное содержание. Сравнительно большим содержанием подвижных форм элемента отличалась горно-таежная торфянистая мерзлотная почва ( $565 \pm 150$  мг/кг). Наименьшее содержание Fe отмечено в горно-тундровой ( $200 \pm 110$  мг/кг) и торфянисто-мерзлотной почвах ( $85 \pm 15$  мг/кг). Горно-таежная обычная и горно-таежная аллювиальная почвы содержали относительно среднее количество Fe ( $299 \pm 65$  и  $296 \pm 47$  мг/кг соответственно).

Алюминий — один из главных компонентов земной коры, присутствует в породах в количестве 0.45–10.0%. Количество растворимых форм элемента составляет 400–460 мкг/л в нейтральной почве. Растворимость Al в зоне почвообразования низкая. Особенно она низка в слабокислых —

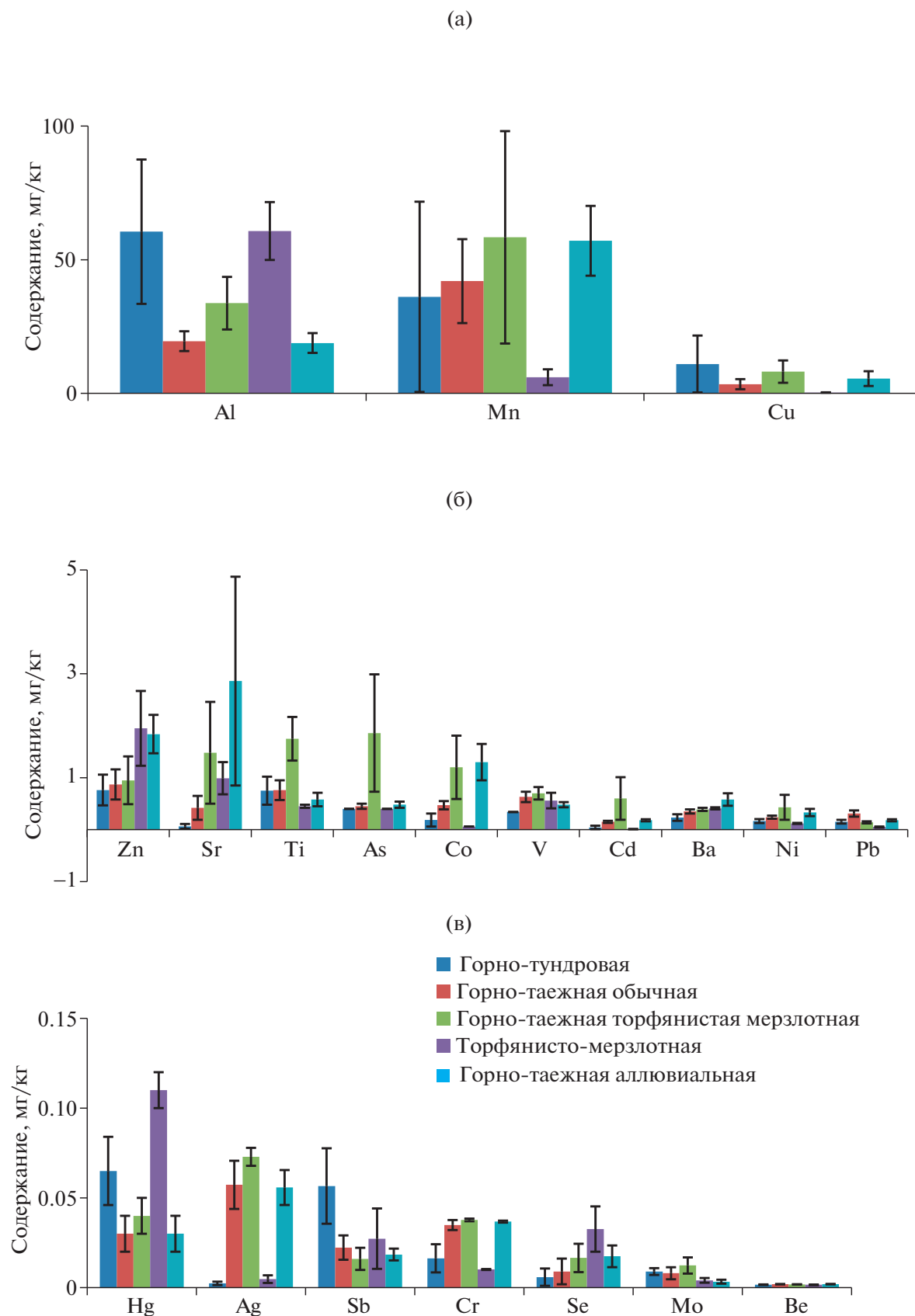
в диапазоне нейтральных условий (pH 5.0–8.0) и снижается при старении осадков. В кислых почвах с pH < 5.5 подвижность Al резко возрастет [8].

В районе исследования содержание в почвах подвижных форм элемента составляло 19–60 мг/кг. В горно-тундровой и торфянистой мерзлотной почвах содержание элемента было достоверно больше (в 3 раза), чем в горно-таежной обычной и горно-таежной аллювиальной почвах (рис. 2а). Это вероятно было связано с более высокой кислотностью таких почв.

Марганец является одним из наиболее распространенных микроэлементов в литосфере. Содержание растворенного Mn в почвенном растворе изменяется от 25 до 2200 мкг/л. Марганец может накапливаться в разных почвенных горизонтах, однако обычно аккумулируется в верхнем слое почв вследствие его фиксации органическим веществом. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Mn в горизонте А составило 50–59 мг/кг, в горизонте С — 16–30 мг/кг [1]. Содержание Mn в горной таежной оподзоленной почве Витимского плоскогорья в слое АВ было равно в среднем 76.2 мг/кг [9].

Содержание элемента в почвах Удокана характеризовались значительным варьированием. Типы почв достоверно не отличались по содержанию Mn, содержание элемента находилось в пределах 36.0–58.0 мг/кг, что не превышало ПДК для подвижных элементов почвы. Только торфянистая мерзлотная почва выделялась низким содержанием элемента ( $6.0 \pm 3.0$  мг/кг). Возможно, это связано с тем, что содержание Mn корреляционно было связано с величиной pH почвы, содержанием подвижного P, обменного Ca и Na (табл. 1).

Медь — относительно малоподвижный элемент в почвах, и ее суммарное содержание сравнительно слабо варьирует в почвенных профилях, оно меняется в пределах 6–60 мг/кг, достигая максимума в ферралитовых почвах и минимума — в песчаных и органических. Аккумуляция в верхних горизонтах — обычная черта распределения Cu в почвенном профиле. Хотя медь — один из наименее подвижных тяжелых металлов в почве, ее содержание в почвенных растворах достаточно велико во всех типах почв. Содержание подвижной Cu в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России находится в пределах 1.0–6.0 мг/кг, в горных почвах Забайкальского края — 1.1–3.1 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижной Cu в горизонте А составило 3.1–4.0, горизонте С — 2.8–3.7 мг/кг [11]. Содержание подвижной Cu в высокогорной таежной почве



**Рис. 2.** Содержание химических элементов в почвах на территории Удоканского месторождения меди: (а) – Al, Mn, Cu, (б) – Zn, Sr, Ti, As, Co, V, Cd, Ba, Ni, Pb, (в) – Hg, Ag, Sb, Cr, Se, Mo, Be.

**Таблица 1.** Корреляция между содержанием химических элементов в почве и ее агрохимическими свойствами (коэффициент Пирсона,  $t_{05}$ )

	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	Гумус, %	P <sub>подв</sub>	K <sub>подв</sub>	N <sub>общ</sub>	Ca <sub>обм</sub>	Mg <sub>обм</sub>	Na <sub>обм</sub>
Sr							0.57		
Ba							0.58		
Mn	0.57	0.50		0.48			0.47		0.58
Pb	0.47			0.57					
Zn					0.66		0.62	0.49	
Cu			0.49			0.60			
Co	0.52								
As						0.40			0.98
Hg	-0.59					0.62			
Al	-0.50								
V								0.42	
Cr	0.68								
Ag	0.42								
Be	0.45								

Витимского плоскогорья в слое АВ было равно в среднем 4.9 мг/кг [9].

Также как и марганца, содержание Cu статистически по типам почвы не различалось. В почвах района исследования элемент содержался в пределах 5.5–11.0 мг/кг, что превышало ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) подвижных элементов в почве в 1.8–3.7 раза. Такой результат, вероятно, связан с тем, что район находится на территории Удоканского месторождения меди. По градации обеспеченности почв России подвижными формами микроэлементов, почвы в таежно-лесной биогеохимической зоне с таким содержанием Cu относятся к очень богатым [12]. Только торфянистая мерзлотная почва выделяется низким ее содержанием ( $0.30 \pm 0.06$  мг/кг). Такая почва относится по обеспеченности элементом к очень бедным. Относительно низкое содержание меди в торфянистой мерзлотной почве, вероятно, связано с низким содержанием в почве гумуса и общего азота. Обнаружена корреляция между содержанием в почве меди и содержанием гумуса и общего азота (табл. 1).

Среднее содержание Zn в поверхностных слоях почв различных стран изменяется в пределах 17–125 мг/кг. Концентрация его в почвенных растворах менялась от 4 до 270 мкг/л в зависимости от свойств почвы. Цинк наиболее подвижен и биологически доступен в кислых легких минеральных почвах. Содержание подвижного Zn в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России составляло в среднем 1.09, в горных почвах – 0.62 мг/кг. В Забайкальском крае в черноземных

почвах обнаружено 0.6 мг Zn/кг, в горных почвах – 0.8 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Zn в горизонте А составило 0.5–0.6, горизонте С – 0.3–0.6 мг/кг [11].

Содержание Zn в районе исследования было достоверно больше в торфянистой мерзлотной и горно-таежной почвах по отношению к горно-тундровой и горно-таежной обычной почвам и составляло 1.84–1.95 мг/кг, что ниже ПДК подвижных элементов почвы (23.0 мг/кг) и соответствовало средним по обеспеченности элементам почвам (рис. 2б). Различия в содержании элемента в почвах, вероятно, были связаны с разной кислотностью почв.

Стронций – распространенный микроэлемент в земной коре, концентрируется преимущественно в магматических породах среднего состава и в карбонатных осадках. Sr легко мобилизуется при выветривании, особенно в кислой окислительной среде. Интервал его содержаний в поверхностных горизонтах составляет 18–3500 мг/кг. В кислых почвах Sr активно вымывается вниз по профилю почвы, в известковых может замещаться различными катионами, в особенности  $H^+$  [13].

Содержание подвижного Sr в почвах района исследования составляло 0.06–2.86 мг/кг. Горно-тундровая почва отличалась от других типов почв значительно более низким содержанием элемента ( $0.06 \pm 0.05$  мг/кг). Эта величина в 36 раз меньше содержания элемента в горно-таежной аллювиальной и горно-таежной торфянистой мерзлотной почвах. Различие в содержании элемента в почвах, возможно, было связано с содержанием

**Таблица 2.** Корреляция между содержанием химических элементов в почве (коэффициент Пирсона,  $r_{05}$ )

Элемент	Sr	Fe	Mn	Pb	Ni	Cd	Co	Hg	Al	Ti	Cr
Ba	0.51										
Co					0.78						
As			0.54								
Hg				-0.41			-0.42				
Al			-0.42				-0.40	0.48			
Ti		0.66									
V		0.55								0.41	
Mo						0.49					
Cr		0.58	0.44	0.45			0.45	-0.57	-0.66		
Ag							0.43	-0.55	-0.43		0.65
Sb									0.43		
Se								0.53	0.42		
Be			0.41								0.62

в них Ca, с которым Sr активно взаимодействует (табл. 2).

Титан – обычный компонент горных пород, в которых его содержание меняется в пределах 0.03–1.40%. Содержание Ti в поверхностном слое почв в целом составляет 0.1–0.9% [13]. Растворимость Ti считается весьма ограниченной, в почвенных растворах составляет всего 0.03 мг/л, что приводит к возрастанию его абсолютных количеств в верхних горизонтах почв в результате потери части глинистых минералов при выветривании. В районе хребта Удокан содержание подвижных форм элемента составляло 0.58–1.75 мг/кг. Достоверно более высоким содержанием титана отличалась горно-таежная торфянистая мерзлотная почва ( $1.75 \pm 0.42$  мг/кг). Это примерно больше в 3 раза, чем в других почвах. Такая разница в содержании элемента, возможно, была связана с более богатыми титаном материнскими породами в местах расположения горно-таежных торфянистых мерзлотных почв. Известно также, что в районе хребта Удокан находится крупнейшее в России Чинейское месторождение титаномагнетитовых руд.

Мышьяк характеризуется довольно однородным распределением в главных типах горных пород. Его содержание, как правило, меняется в пределах 0.5–2.5 мг/кг, и лишь в глинистых отложениях оно относительно велико (13 мг/кг). Наиболее низкое содержание As характерно для песчаных почв, а максимальное – связано с аллювиальными почвами и почвами, обогащенными органическим веществом [13]. Подвижность As прямо пропорциональна его поступлению и обратно – времени и содержанию железа и алюми-

ния. В экспериментах в водную вытяжку переходит 5–10% содержащегося в почве элемента [14].

В районе исследования содержание подвижных форм As составляло 0.4–1.9 мг/кг. Подобно Ti, содержание As было больше (в 4 раза) в горно-таежной торфянистой мерзлотной почве ( $1.86 \pm 1.13$  мг/кг) по отношению к другим типам почв. Возможно, это было связано, относительно других типов почв, с большим содержанием железа в горно-таежной торфянистой мерзлотной почве. Известно, что в почве мышьяк предпочтительнее образует малорастворимые соединения с гидроксидами железа [15].

В земной коре высокие концентрации кобальта характерны для ультраосновных пород (100–220 мг/кг), а его содержание в кислых породах значительно меньше (1–15 мг/кг). Концентрация Co в растворах большинства почв, как правило, достаточно низкая и изменяется от 0.3 до 87 мг/л. Содержание подвижного Co в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России находится в пределах 0.5–3.1 мг/кг. В черноземных почвах Забайкальского края содержится 0.9–2.2 мг Co/кг, в горных почвах – 0.6...–1.8 мг/кг [10]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Co в горизонте А составило 0.8–1.0, горизонте С – 0.5–0.6 мг/кг [11].

В почвах хребта Удокан достоверно большее содержание элемента отмечено в горно-таежной торфянистой мерзлотной и горно-таежной аллювиальной почвах (1.2–1.3 мг/кг). Такое содержание элемента характеризует почву как среднеобеспеченную. Относительно низким содержанием Co отличалась торфянистая мерзлотная почва ( $0.06 \pm 0.00$  мг/кг). Содержание элемента в



почвах было значительно меньше ПДК. Для подвижных элементов почвы установлена ПДК, равная 5.0 мг/кг. Относительно низкое содержание  $\text{Co}$  в торфянистой мерзлотной почве, вероятно, объясняется более низким рН почвы (табл. 1). Содержание элемента в кислых породах значительно меньше [13].

Ванадий концентрируется преимущественно в основных породах и сланцах в пределах 100–250 мг/кг. Известна склонность  $\text{V}$  ассоциироваться с органическим веществом, поэтому в органических сланцах и биолитах его содержание обычно повышено. В целом распределение этого элемента в почвенном профиле довольно однородно, а существующие вариации обусловлены составом материнских пород. Как правило, самое высокое содержание  $\text{V}$  (150–460 мг/кг) характерно для почв, развитых на основных породах, а самое низкое (5–22 мг/кг) – для торфянистых почв. Суглинистые и песчаные почвы, как и ферралитные, также содержат повышенное количество  $\text{V}$ , превосходящее его количество в материнских породах. Среднее мировое валовое содержание  $\text{V}$  в почвах оценивается в 90 мг/кг [13].

Почвы хребта Удокан не различались достоверно по содержанию подвижных форм элемента (0.34–0.70 мг/кг). Относительно низкое содержание  $\text{V}$  отмечено в горно-тундровой почве ( $0.34 \pm 0.00$  мг/кг).

Распространенность кадмия в магматических и осадочных породах не превышает 0.3 мг/кг. Концентрируется  $\text{Cd}$  в глинистых осадках и сланцах. Среднее содержание элемента в почвах варьирует от 0.07 до 1.1 мг/кг. Элемент наиболее подвижен в кислых почвах в интервале рН 4.5–5.5, тогда как в щелочных он относительно неподвижен. В почвах, развивающихся в условиях гумидного климата, миграция  $\text{Cd}$  вниз по профилю более вероятна, чем его накопление в поверхностном горизонте почв.

В районе исследования содержание подвижного  $\text{Cd}$  находилось в пределах 0.01–0.60 мг/кг. Относительно высоким содержанием элемента отличалась горно-таежная мерзлотная торфянистая почва ( $0.60 \pm 0.41$  мг/кг). Возможно, большее содержание элемента в почве связано с тем, что горно-таежные мерзлотные почвы формируются на плоских или полого наклоненных участках, где и происходит накопление элемента.

В земной коре барий концентрируется преимущественно в средних и кислых магматических породах, при этом пределы его содержания составляют, как правило, 400–1200 мг/кг. В почвах  $\text{Ba}$  легко мобилизуется в различных условиях,

поэтому его количество в почвенных растворах обнаруживает значительные вариации.

В районе хребта Удокан содержание подвижного  $\text{Ba}$  в почвах находилось в пределах 0.23–0.58 мг/кг. Более высокое содержание элемента характерно для горно-таежной аллювиальной почвы ( $0.58 \pm 0.12$  мг/кг) и относительно низкое – для горно-тундровой почвы ( $0.23 \pm 0.06$  мг/кг).

Содержание  $\text{Ni}$  в почвах мира изменяется в широких пределах – от 1 до  $\approx 100$  мг/кг. Самое высокое содержание  $\text{Ni}$  отмечено в глинистых и суглинистых почвах, в почвах на основных и вулканических породах и в почвах, богатых органическим веществом. Особенно высокими уровнями содержания отличаются торфянистые серпентинитовые почвы, в которых никель присутствует в виде легкорастворимых органических комплексов [13].

Содержание подвижного элемента в почвах района исследования достоверно не различалось и находилось в пределах 0.17–0.43 мг/кг. Это не превышало ПДК подвижных элементов в почве (4.0 мг/кг). Только торфянистая мерзлотная почва содержала относительно меньшее его количество ( $0.12 \pm 0.01$  мг/кг). Вероятно, это было связано с тем, что с увеличением кислотности горных пород содержание  $\text{Ni}$  уменьшалось. Известно также, что в распределении никеля, кобальта в земной коре отмечено большое сходство [13].

Свинец в земной коре накапливается в кислых сериях магматических пород и в глинистых осадках. Среднее содержание в разных типах почв составляет 10–67 мг/кг.  $\text{Pb}$  среди тяжелых металлов наименее подвижен. Наибольшее содержание металла обнаруживают в обогащенном органическим веществом верхнем слое необрабатываемых почв. Содержание растворимых форм  $\text{Pb}$  в водных вытяжках составляет в тундровых оподзоленных почвах в горизонтах А–С от 3 до 17 мкг/л. Наибольшая растворимость  $\text{Pb}$  характерна для кислых дерново-подзолистых почв [14].

В почвах хребта Удокан достоверно большее содержание подвижного  $\text{Pb}$  обнаружено в горно-таежной обычной почве ( $0.31 \pm 0.06$  мг/кг), самое низкое содержание – в торфянистой мерзлотной почве ( $0.05 \pm 0.01$  мг/кг). Разница в содержании элемента, возможно, связана с большим накоплением органического вещества в поймах рек и на южных склонах, где преимущественно располагаются горно-таежные обычные почвы. Содержание элемента в почве значительно меньше ПДК подвижных элементов почвы (6.0 мг/кг).

Во всех типах магматических порода содержание  $\text{Hg}$  очень низкое. Более высокое содержание

этого элемента характерно для осадочных пород, глинистых сланцев и особенно богатых органическим веществом глинистых сланцев. Содержание элемента в верхнем слое почвы в несколько раз больше, чем в подпочвенных горизонтах. Среднее содержание Hg в поверхностном слое почв не превышает 400 мкг/кг. Валовое содержание Hg в почвообразующих породах Забайкалья в основном изменяется от 0.004 до 0.024 мг/кг, наиболее часто встречающееся содержание — 0.004–0.01 мг/кг. Фоновое валовое содержание Hg в почвах Забайкалья составляет 0.018 мг/кг, что больше кларка почв (0.01 мг/кг) [16]. ПДК валового содержания Hg в почве с учетом кларка равно 2.1 мг/кг.

В районе исследования в торфянистой мерзлотной почве обнаружено достоверно большее содержание подвижных форм элемента ( $0.11 \pm 0.01$  мг/кг). Это в 2.6 раза больше, чем среднее содержание в других типах почв, равное 0.03–0.07 мг/кг. Содержание Hg в горно-тундровой почве достоверно больше, чем в горно-таежной и горно-таежной аллювиальной почвах (рис. 2в). Такой результат, вероятно, связан с тем, что горно-таежные аллювиальные почвы, расположенные в поймах рек, содержат больше органического вещества, чем горно-тундровые почвы.

Геохимические свойства Ag похожи на свойства Cu, но его содержание в породах примерно в 1000 раз меньше. Обычный уровень содержания серебра в почвах составляет 0.03–0.09 мг/кг.

Содержание подвижных форм серебра в почвах хребта Удокан значительно различалось. Низкое содержание Ag отмечено в горно-тундровой и торфянистой мерзлотной почвах (0.002–0.005 мг/кг). Это в 18 раз меньше среднего содержания элемента в других типах почв (0.56–0.073 мг Ag/кг). Возможно, низкое содержание серебра в почвах было связано с величиной pH и взаимодействием химических элементов. Обнаружена корреляционная связь содержания Ag с pH почвы и содержанием Co, Cr, Hg, Al (табл. 1).

В верхних слоях почв содержание Sb изменяется от 0.05 до 4.0 мг/кг. Кларк почвы равен 1.0 мг Sb/кг. В районе хребта Удокан содержание подвижных форм Sb находится в пределах 0.02–0.06 мг/кг. В горно-тундровой почве было достоверно большее содержание элемента, чем в других типах почв, кроме торфянистой мерзлотной почвы. Известно, что содержание сурьмы в почве может быть связано с месторождениями цветных металлов [13], например, меди, содержание которой в горно-тундровой почве больше, чем в других почвах. В наших исследованиях обнаружена

достоверная положительная корреляция между содержанием в почве сурьмы и меди (табл. 2).

Наиболее значительное содержание Cr характерно для ультраосновных и основных горных пород. Содержание Cr в кислых изверженных и осадочных породах значительно меньше и в общем случае изменяется в пределах 5–120 мг/кг.

В почвах района исследования выявлены значительные различия в содержании элемента. Достоверно относительно низким содержанием Cr характеризовались горно-тундровая и торфянисто-мерзлотная почвы, что могло быть связано с различной кислотностью почвы и взаимодействием элементов (табл. 2). Содержание Cr в других типах почв было близким по величине (0.03–0.04 мг/кг). ПДК подвижного Cr составляет 6.0 мг/кг.

Содержание Se в магматических породах редко превышает 0.05 мг/кг. Наименьшее его содержание отмечено в песчаниках и известняках. Среднее валовое содержание Se в поверхностном слое почв земного шара составляет 0.40 мг/кг. В Китае в эндемических по недостатку селена районах содержание его растворимой формы варьирует от 0.0002 до 0.002 мг/кг [14]. Почвы района исследования достоверно не отличались по содержанию подвижных форм элемента (0.009–0.033 мг Se/кг). Только в торфянистой мерзлотной почве содержание Se было достоверно больше, чем в горно-тундровой почве, что возможно объясняется взаимодействием элементов. Отмечена положительная корреляция содержания в почве Se с содержанием в ней Hg и Al (табл. 2).

Содержание Mo в почвах обычно близко к его количеству в материнских породах, а в почвах мира изменяется в пределах 0.013–17.0 мг/кг. Содержание подвижного Mo в почвах таежно-лесной нечерноземной зоны России составляет в среднем 0.16 мг/кг, в горных почвах — 0.74 мг/кг [9]. В почвах Бурятии среднее содержание подвижного Mo в горизонте А составило 0.05–0.08, горизонте С — 0.04–0.06 мг/кг [11].

Содержание подвижных форм элемента в почвах хребта Удокан было близким по величине (0.008–0.012 мг/кг). В то же время относительно низким содержанием Mo отличались торфянистая мерзлотная и горно-таежная аллювиальная почвы (0.003–0.004 мг/кг). Известно, что растворимость и доступность молибдена для растений во многом зависят от pH среды и условий дренирования почв. Содержание молибдена в почвах обычно близко к его количеству в материнских породах [13]. По градации обеспеченности почв

подвижными микроэлементами почвы Удокана относятся к очень бедным [12].

Бериллий обнаруживается повсеместно, присутствует в относительно малых количествах (<10 мг/кг) в главных типах пород. Содержание валового Ве в почвах изменяется в пределах 1.2–13.0 мг/кг. Кларк валового содержания Ве для почв составляет  $1.7 \pm 0.5$  мг/кг. Концентрация элемента в почвенном растворе составляет 0.4–1.0 мкг/л [8]. Подвижные формы Ве в почвах хребта Удокан по типам почв статистически не отличались, что составляло  $\approx 0.002$  мг Ве/кг.

Расположение места отбора почвы над уровнем моря было коррелятивно связано с содержанием в почвах гумуса ( $r = 0.42$ ), обменного Са ( $r = -0.48$ ), Mg ( $r = -0.47$ ) и таких микроэлементов как Sr ( $r = -0.40$ ), Ba ( $r = -0.47$ ), Co ( $r = -0.40$ ) и Al ( $r = 0.44$ ).

Между агрохимическими показателями почвы также выявлены корреляционные связи. Например, с величиной рН водной и солевой вытяжек было связано содержание в почвах подвижного Р и обменного Са. Статистически достоверные коэффициенты корреляции Пирсона находились в пределах 0.40–0.52. Кроме того, обнаружена зависимость содержания в почве обменного Са с содержанием подвижных Р и К, коэффициент Пирсона соответственно был равен 0.43 и 0.84, а также между обменными Na и Mg ( $r = 0.40$ ).

На содержание химических элементов в почве влияли ее агрохимические свойства. Например, с величиной рН<sub>Н2О</sub> коррелятивно было связано содержание в почве таких микроэлементов как Mn, Pb, Co, Hg, Al, Cr, Ag и Be. Количество обменного кальция коррелировало с содержанием в почве Sr, Ba, Mn и Zn (табл. 1). Также между содержанием химических элементов в почве обнаружены статистически достоверные коррелятивные связи. По количеству таких связей с элементами можно выделить Al, Cr, Co и Hg (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выявить особенности содержания подвижных форм химических элементов в различных типах почв на территории Удоканского месторождения меди. Содержание ряда химических элементов статистически различалось в зависимости от типа почв.

Горно-тундровая почва характеризовалась относительно высоким содержанием гумуса, общего N, подвижных форм Al, Mn, Cu, Hg, Sb и относительно низким содержанием подвижных форм P, K, Fe, Zn, Sr, As, Co, V, Cd, Ba, Ni, Ag, Cr, об-

менного Са и Mg. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be.

Горно-таежная обычная почва характеризовалась относительно высоким содержанием подвижного Р, обменного Mg, подвижных форм Ag, Cr и относительно низким содержанием гумуса, общего N, обменного Са, подвижных форм Al, Cu, Zn, Cr, As, Co, Cd, Hg, Sb, Se. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > Zn > Ti > V > Co > As > Sr > Ba > Pb > Ni > Cd > Ag > Cr > Hg > Sb > Se > Mo > Be.

Горно-таежная торфянисто мерзлотная почва характеризовалась относительно высоким содержанием гумуса, общего N, обменного Са, Mg, подвижных форм Fe, Mn, Sr, Ti, As, Co, V, Cd, Ni, Ag, Cr, Mo и относительно низким содержанием подвижных форм P, K, Al, Zn, Hg, Sb. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > As > Ti > Sr > Co > Zn > V > Cd > Ni > Ba > Pb > Ag > Hg > Cr > Se > Sb > Mo > Be.

Торфянисто-мерзлотная почва характеризовалась относительно высоким содержанием подвижных форм K, Al, Zn, V, Ba, Hg, Sb, Se и относительно низким содержанием P, Fe Mn, Cu, Cr, Ti, As, Co, Cd, Ni, Pb, Ag, Cr, Mo. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Al > Mn > Zn > Sr > V > Ti > Ba > As > Cu > Ni > Hg > Co > Pb > Se > Sb > Cr > Cd > Ag > Mo > Be.

Горно-таежная аллювиальная почва характеризовалась относительно высоким содержанием обменного Са и Mg, подвижных форм P, Mn, Zn, Sr, Co, V, Ba, Ni, Ag, Cr и относительно низким содержанием подвижных форм Al, Ti, As, Hg, Sb, Mo. Содержание элементов в почве распределялось в следующей последовательности: Fe > Mn > Al > Cu > Sr > Zn > Co > Ba > Ti > As > V > Ni > Pb > Cd > Ag > Cr > Hg > Sb > Se > Mo > Be.

Обнаружена корреляционная связь содержания Sr, Ba, Co и Al с высотой расположения над уровнем моря места отбора почвенных проб, а также корреляционные связи ряда химических элементов с агрохимическими свойствами почвы и между собой. Содержание химических элементов в почве не превышало ПДК, кроме меди.

Представленное исследование проведено в районе хребта Удокан впервые. Оно позволяет организовать наблюдения за изменением качества окружающей среды, учитывать их при орга-

низации выращивания растений. Работа вносит определенный вклад в изучение природы и экологии севера Забайкальского края.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пельмский Г.А., Лантева Н.И. Благородные металлы в рудах Удокана // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 88–91.
2. Зиновьев Ю.И. Геохимические особенности Сакуканских отложений и медных руд Удокана // Горный информ.-аналит. бюл. 2009. № 53. С. 63–68.
3. Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В. Гидрогеохимия рек по трассе проектируемого нефтепровода “Восточная Сибирь–Тихий океан” в междуречье Витим–Олекма // Водн. ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 345–355.
4. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, ГИРЗ, Минсельхоз СССР, 1973. 93 с.
5. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
6. Природные условия освоения Севера Читинской области. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 127 с.
7. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справ-к: В 6 кн. М.: Экология, 1995. Кн. 4. Главные *d*-элементы. 416 с.
8. Иванов В.В. Экологическая химия элементов: Справ-к. М.: Недра, 1994. Кн. 3. 304 с.
9. Иванов Г.М. Микроэлементы-биофилы в ландшафтах Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. 239 с.
10. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 180 с.
11. Абашеева Н.Е. Агрохимия почв Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1992. 214 с.
12. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 583 с.
13. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
14. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справ-к. В 6 кн. М.: Недра, 1996. Кн. 3. Редкие р-элементы. 352 с.
15. Солодухина М.А., Юргенсон Г.А. Мышьяк в ландшафтах Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье). Чита: ЗабГУ, 2018. 176 с.
16. Иванов Г.М., Кашин В.К. Ртуть в гумусовых горизонтах почв Забайкалья // Почвоведение. 2010. № 1. С. 30–36.

## Content of Chemical Elements in Soils on the Territory of the Udokan Copper Deposit

V. P. Makarov<sup>a, #</sup>, N. Yu. Mikheeva<sup>a</sup>, and S. V. Borzenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS  
ul. Nedorezova 16a, Chita 672014, Russia

<sup>#</sup>E-mail: vm2853@mail.ru

The article deals with the features of the distribution of mobile forms of chemical elements in various types of soil on the territory of the Udokan copper deposit, in the Kalarsky district of the Trans-Baikal Territory. The aim of the work was to identify the features of the distribution of chemical elements in the soils of the Udokan copper deposit area. Soil cover studies were conducted in June and August 2011. The content of chemical elements was determined in mountain-tundra and mountain-taiga soils. 36 soil sections were laid, and a morphological description of the sections was carried out. The analysis of the elemental composition by soil type was carried out at a depth of up to 50 cm. The content of 21 trace elements in the soil was determined. The average content of mobile elements in the soils on the territory of the copper deposit was in the following sequence: Fe > Al > Mn > Cu > Zn > Ti > As > V > Ba > Co > Ni > Pb > Hg > Sr > Sb > Cd > Cr > Mo > Se > Ag > Be. The studied soil types differed in the concentration of chemical elements, and a correlation was found between the elements and the height of the sampling site above sea level. The results obtained can be used to study changes in the quality of the environment in the research area. In general, the concentration of chemical elements in the soils was significantly lower than their average content in the earth's crust.

*Key words:* Udokan copper deposit, soils, chemical elements.