

**Д.В. МОСКОВЧЕНКО\*, \*\*, А.А. ЮРТАЕВ\*\*, Е.В. АБАКУМОВ\*\*\***

\*Тюменский научный центр СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия, moskovchenko@hotmail.ru

\*\*Тюменский государственный университет,  
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия, moskovchenko@hotmail.ru, yurtaevgeo@yandex.ru

\*\*\*Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Санкт-Петербург,  
16-я линия Васильевского острова, д. 29, пом. 5, Россия, e\_abakumov@mail.ru

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ АРКТОТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ОСТРОВА БЕЛЫЙ (КАРСКОЕ МОРЕ)

*Изучены особенности химического состава почв основных ландшафтных комплексов о. Белый (Карское море) — плоских водоразделов, склонов морских террас, речных и озерных пойм, приморской лавды. В пробах почв определено содержание металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Hg, Pb), общего углерода и азота, изучен гранулометрический и ионно-солевой состав. Выявлено, что ландшафты относятся к трем классам водной миграции — кислому, кислому глеевому и солонечно-сульфидному. Почвы острова имеют преимущественно песчаный состав и отличаются низким содержанием рассеянных элементов. Среднее значение кларков концентрации (КК) для Cr — 0,2; Cu — 0,3; Mn и Fe — 0,4; Zn — 0,7; Hg — 0,9. Минимальное содержание элементов отмечено в псаммоземах водоразделов и склонов морских террас, где КК = 0,1–0,4. Содержание рассеянных элементов связано положительной корреляционной зависимостью с количеством илстой и пылеватой фракций. Отмечено увеличение концентрации физической глины, водорастворимых солей и рассеянных элементов в почвах аккумулятивных ландшафтов. Содержание Zn в почвах автономных ландшафтов составляет 12,9–28,9 мг/кг, в аккумулятивных ландшафтах лавды увеличивается до 70 мг/кг, а в супераквальном ландшафте — до 92 мг/кг. Содержание Cu в почвах аккумулятивных ландшафтов по сравнению с автономными возрастает в 1,4–8,1 раза, в озерных осадках — в 15. В вертикальном профиле почв распределение микроэлементов зависит от биогенного накопления и аккумуляции на мерзлотном геохимическом барьере. Радиальное распределение Mn, Fe, Zn, Pb в глееземах имеет элювиально-иллювиальный характер: максимальное содержание отмечено в поверхностных органогенных и надмерзлотных горизонтах.*

Ключевые слова: Западная Сибирь, геохимия ландшафтов, почвы, тяжелые металлы, солевой состав.

**D.V. MOSKOVCHENKO\*, \*\*, A.A. YURTAEV\*\*, E.V. ABAKUMOV\*\*\***

\*Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
625026, Tyumen, ul. Malygina, 86, Russia, moskovchenko@hotmail.ru

\*\*Tyumen State University,  
625003, Tyumen, ul. Volodarskogo, 6, Russia, moskovchenko@hotmail.ru, yurtaevgeo@yandex.ru

\*\*\*St. Petersburg State University,  
199178, St. Petersburg, 16-ya Liniya Vasil'evskogo ostrova, d. 29, pom. 5, Russia, e\_abakumov@mail.ru

## GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOILS OF ARCTIC TUNDRA LANDSCAPES ON BELYI ISLAND (KARA SEA)

*A study is made of the characteristic features in the soil chemical composition for the main landscape complexes on Belyi Island (Kara Sea): flat watersheds, slopes of the marine terraces, river and lake valleys, and sea coast layda. Soil samples were examined on content of main trace elements (Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Hg, and Pb), total organic carbon and nitrogen, particle size distribution and ion-salt composition. It was shown that the landscapes refer to three classes of water migration: acids, acid gleyic and salt sulfidic. Soils of the island are characterized mainly by sand texture and low content of trace elements. The mean values of concentration Clarkes (CC) were 0,2, 0,3, 0,4, 0,4, 0,7 and 0,9 for Cr, Cu, Mn, Fe, Zn and Hg, respectively. The lowest content of trace elements was recorded for arenosols of watersheds and the marine terrace slopes, where CC = 0,1–0,4. Content of trace elements is related by a positive correlation with the quantity of clay and silt fractions. The study revealed an increase in the concentration of aliphite, water-soluble salts and trace elements in soils of accumulative landscapes. The Zn content in soils of accumulative landscapes is 12,9–28,9 mg/kg, whereas this value increases to 70 mg/kg in accumulative*

*landscapes of laydas and to 92 mg/kg in superaquatic landscapes. The Cu content in accumulative landscapes, in comparison with autonomous landscapes, increases by a factor of 1,4–8,1, and by a factor of 15 in lake sediments. In the vertical soil profile, the distribution of the trace elements is recognized to be dependent from biogenic accumulation and that on the permafrost geochemical barrier. The radial (lateral) distribution of Mn, Fe, Zn and Pb in the gleysols is characterized by the eluvial-illuvial type: the maximum values were recorded in the superficial biogenic and suprapermafrost layers.*

Keywords: *Western Siberia, geochemistry of landscapes, soils, heavy metals, salt composition.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активизировалось исследование природной среды Арктики, что связано с перспективой освоения минерально-сырьевых ресурсов и ключевой ролью этого региона в глобальных процессах изменения климата. Атмосферная миграция тяжелых металлов в Арктике представляет собой серьезную общенаучную и экологическую проблему [1]. Неоднократно отмечались случаи загрязнения металлами атмосферного воздуха и почв полярных территорий [2–4]. На севере Сибири атмосферные выпадения Cu, Ni, Pb, источниками которых являются промышленные регионы Урала и Норильска, соизмеримы с выносом этих элементов р. Обь [3]. Вместе с тем арктические геосистемы слабо устойчивы к различным формам техногенеза, в том числе к загрязнению, поскольку скорость химических реакций, приводящих к разложению загрязнителей, здесь очень мала [5]. К показателям слабой устойчивости относится также низкая емкость биотических миграционных потоков, т. е. соотношение масс химических элементов, участвующих в биогеохимическом круговороте, и элементов, приносимых извне с абиотическими потоками [6]. Геохимическое своеобразие арктических почв и покровных отложений проявляется в особенностях распределения и миграции рассеянных элементов, которые обычно имеют кларки концентраций  $<1$  [1]. Недостаток элементов в почвах — один из факторов снижения емкости биогеохимического круговорота и, следовательно, снижения устойчивости геосистем. Таким образом, прогноз устойчивости арктических ландшафтов должен учитывать фоновые уровни содержания рассеянных элементов, а также тип их распределения, т. е. фоновую геохимическую структуру, отражающую латеральные и радиальные связи между отдельными блоками и подсистемами ландшафта [7].

Один из малоисследованных объектов Арктики — о. Белый, расположенный в Карском море, к северу от п-ова Ямал. Остров лежит в арктотундровой ландшафтно-геохимической области, для которой характерны азотный тип биологического круговорота и преобладание ландшафтов кислого глеевого класса водной миграции [8]. Только в последнее пятилетие появились сведения о химическом составе почв, четвертичных отложений и пластовых льдов этой территории [9–12]. Остров удален от основных источников аэротехногенного загрязнения в российском секторе Арктики (металлургических комбинатов Кольского полуострова, Норильска, Урала).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Остров Белый сложен морскими верхнечетвертичными осадками, которые характеризуются высокой макрольдистостью [9]. В ходе трансгрессий и регрессий сформировались три основные морфоструктурные единицы: приморская лайда с высотой поверхности до 3 м над ур. моря, первая (3–7 м) и вторая (6–12 м) морские террасы [13]. Повсеместно распространены многолетнемерзлые породы. В структуре почвенного покрова представлены глееземы, торфяно-глееземы, псаммоземы, пелоземы, маршевые засоленные почвы. На водоразделах преобладают слабодренированные травяно-моховые тундры и относительно дренированные ивнячково-травяно-лишайниково-моховые (ракомитриевые) пятнистые тундры, образующие сочетания с низинными осоково-сфагновыми и травяно-моховыми болотами [14]. На побережьях острова развиты лайды — плоские переувлажненные морские равнины с разнотравно-злаковыми и осоковыми галофитными лугами на засоленных почвах.

Изучение фоновой ландшафтно-геохимической структуры было проведено на шести ключевых участках (рис. 1), на каждом из которых исследовались почвы элювиальных, транзитных и аккумулятивных ландшафтов. Пробы были отобраны из поверхностных горизонтов. Для изучения радиальной дифференциации вещества в северо-западной части острова проведен послойный, с интервалом 10 см, отбор проб из 14 прикопок.

В соответствии с особенностями водной миграции нами выделены три класса геохимических ландшафтов: кислый ( $H^+$ ), кислый глеевый ( $H^+ - Fe^{2+}$ ) и солесно-сульфидный ( $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $H_2S$ ). Ландшафты, относящиеся к кислому классу водной миграции, располагаются на возвышениях водо-

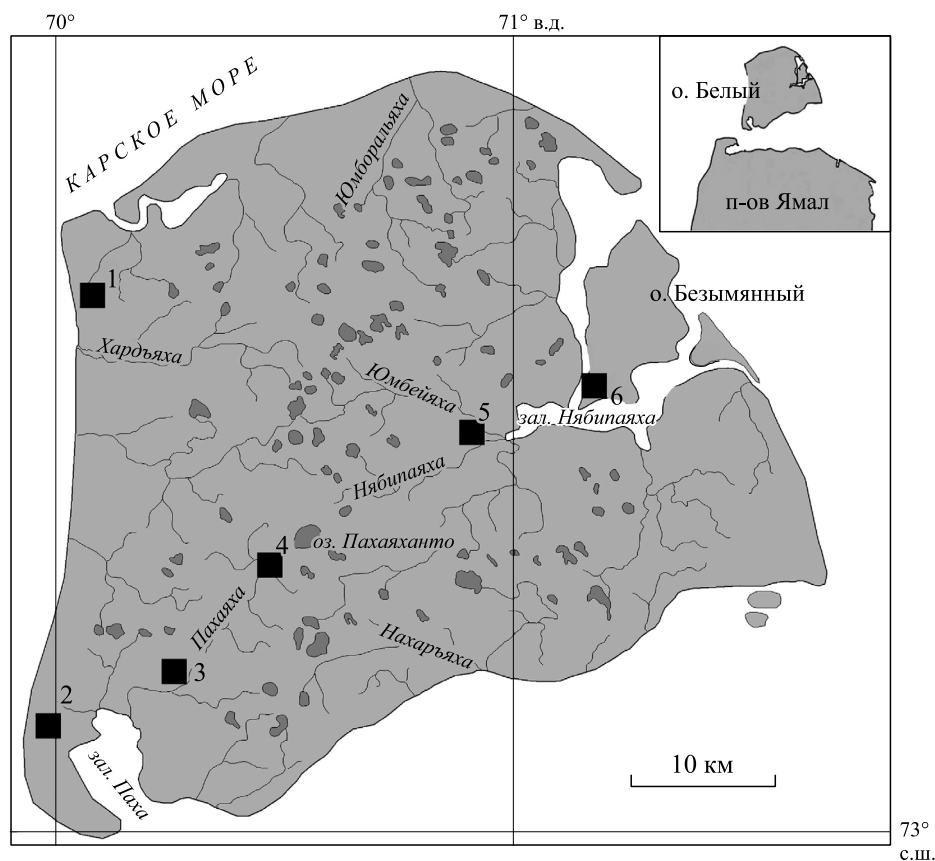


Рис. 1. Схема опробования.

Геохимические ландшафты и ландшафтно-геохимические сопряжения (см. табл. 1, 2). Квадратами показаны ключевые участки (1–6).

разделов и хорошо дренированных пологих склонах, сложенных песчаными породами. Они отчетливо диагностируются по широкому распространению в напочвенном покрове лишайников. Автономные позиции занимают осочково-мохово-лишайниковые тундры, в трансэлювиальных ландшафтах склонов развиты ивнячково-мохово-ракомитриевые тундры с псаммоземами иллювиально-ожелезненными на верхнеплейстоценовых морских песчаных отложениях.

Наиболее распространены ландшафты, относящиеся к кислому глеевому классу. Они встречаются в различных геоморфологических условиях — на плоских водоразделах, в речных долинах, приозерных понижениях, а также на повышенных участках лайды. Геохимически автономные водораздельные супераквальные ландшафты представлены осоково-моховыми заболоченными тундрами на глееземах иллювиально-ожелезненных. Подчиненное положение занимают трансупераквальные ландшафты речных долин с осоково-сфагновыми сообществами и аккумулятивные супераквальные осоково-сфагновые ландшафты приозерных понижений. На морском побережье и в низовьях рек протянулись аккумулятивные ландшафты лайды, относящиеся к солонсно-сульфидному классу, для которого характерно засоление почв (суммарное содержание водорастворимых солей  $>0,1\%$ ) и сульфидогенез. В пределах лайды преобладают травяно-осоковые, разнотравно-осоково-злаковые сообщества на маршевых засоленных почвах.

Обобщение результатов исследований позволило выделить девять геохимических ландшафтов, различающихся по условиям миграции вещества, формам рельефа, распределению почвенно-растительных комплексов (табл. 1). В ходе исследований отмечено несколько пространственных комбинаций автономных, транзитных и аккумулятивных ландшафтов на катенах, характеризующих основные ландшафтно-геохимические сопряжения (водораздельно-озерный, водораздельно-долинный, водораздельно-лайдовый) (табл. 2).

В пробах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на приборе «AA-6300 Shimadzu» были определены валовое содержание и подвижные формы металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Cr, Hg, Pb).

Таблица 1

Геохимические ландшафты о. Белый

Номер ландшафта	Геохимические ландшафты	Тип ландшафта по условиям миграции веществ и класс водной миграции
1	Осоково-мохово-лишайниковые тундры дренированных морских террас с псаммоземами иллювиально-ожеженными на верхнечетвертичных морских отложениях	Автономный элювиальный (H <sup>+</sup> )
2	Осоково-моховые тундры плоских слабодренированных морских террас с глееземами иллювиально-ожеженными на верхнечетвертичных морских отложениях	Автономный супераквальный (H <sup>+</sup> -Fe <sup>2+</sup> )
3	Ивнячково-мохово-ракомитриевые тундры склонов морских террас с псаммоземами иллювиально-ожеженными на верхнечетвертичных морских отложениях	Трансэлювиальный (H <sup>+</sup> )
4	Осоково-сфагновые заболоченные тундры пологих склонов морских террас с глееземами иллювиально-ожеженными на верхнечетвертичных морских отложениях	Транссупераквальный (H <sup>+</sup> -Fe <sup>2+</sup> )
5	Осоково-сфагновые заболоченные луга речных долин с глееземами перегнойно-торфяными на верхнечетвертичных морских отложениях	» »
6	Травяно-осоковые луга притеррасных участков лайды с псаммоземами на современных морских отложениях	» »
7	Осоково-сфагновые болота приозерных понижений с глееземами перегнойно-торфяными на верхнечетвертичных морских отложениях	Аккумулятивный супераквальный (H <sup>+</sup> -Fe <sup>2+</sup> )
8	Травяно-осоковые луга лайды с маршевыми засоленными почвами на современных морских отложениях	Аккумулятивный суперсубаквальный (Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> S)
9	Прибрежные участки акваторий мелководных озер с арктофилово-осоково-гипновыми сообществами на современных озерных отложениях	Аккумулятивный субаквальный (Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> S)

Для оценки валового содержания раствор анализируемой пробы получали путем разложения навески смесью концентрированных соляной, азотной и фтористоводородной кислот при температуре 260 °С с последующим добавлением раствора (1:1) серной кислоты, упариванием и растворением остатка в концентрированной HNO<sub>3</sub>. Подвижные (обменные) соединения металлов экстрагировали ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8. Массовую долю ртути вычисляли методом «холодного пара» с использованием анализатора «РА-915М». Реакция почвенных растворов (рН) была определена в водной вытяжке потенциометрическим методом на приборе «Анион-4100». Массовые доли водорастворимых форм анионов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>) вычисляли методом ионной хроматографии с использованием хроматографа «ICS-2100 Dionex», содержание гидрокарбонатов — кислотным титрованием. Водорастворимые формы катионов Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> определяли с помощью капиллярного электрофореза с использованием системы «Капель-105М». Содержание общего углерода (ТС) и общего связанного азота (TNb) устанавливали методом элементного анализа (Vario TOC Cube «Elementar»), массовую долю суммы поглощенных оснований (СПО) в почве — методом кислотно-основного титрования (метод Каппена). Гранулометрический состав (фракции >0,5; 0,25–0,5; 0,1–0,25; 0,05–0,1; 0,01–0,05; 0,002–0,01 и <0,002 мм) был определен методом лазерной дифракции при помощи гранулометра «Mastersizer 3000 (Malvern)».

Характер и контрастность распределения элементов оценивали с помощью коэффициента латеральной дифференциации L (отношения содержания элемента в почвах подчиненных ландшафтов к содержанию в почвах автономных позиций) и коэффициента радиальной дифференциации R (отношения содержания элемента в генетических горизонтах почв к содержанию в породе) [15]. Коэффициенты корреля-

Таблица 2

Ландшафтно-геохимические сопряжения о. Белый

Участок (см. рис. 1)	Тип сопряжения	Геохимические ландшафты (в соответствии с табл. 1)
1	Водораздельно-лайдовое	1 → 3 → 5 → 8
	То же	1 → 4 → 8
2	Водораздельно-лайдовое	2 → 3 → 5 → 6
3	Водораздельно-озерное	2 → 3 → 7
4	Водораздельно-пойменное	2 → 4 → 5
5	Водораздельно-озерное	2 → 3 → 7
6	Водораздельно-лайдовое	2 → 4 → 8
	Водораздельно-озерное	2 → 7 → 9

ции между показателями химического и гранулометрического состава, физико-химическими характеристиками вычисляли с использованием Microsoft Excel.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех обследованных образцах содержание физического песка существенно больше содержания физической глины (табл. 3). Фракция крупного песка практически отсутствует, в единичных пробах отмечено содержание 0,1 %. Фракция мелкого песка (0,05–0,25 мм) доминирует в гранулометрическом составе почв водораздельных участков (ландшафты 1–4, см. табл. 1). В почвах аккумулятивных ландшафтов (ландшафты 7–9, см. табл. 1) преобладает фракция крупной пыли (0,01–0,05 мм). Доля крупнопылевой фракции изменяется от 33 до 40 %, фракции средней и мелкой пыли (0,002–0,01 мм) в сумме составляют 15–24 % (рис. 2). Илистая фракция в обследованных почвах представлена незначительно, максимальное значение (4,5 %) отмечено в аккумулятивном субкавальном ландшафте. Таким образом, в почвах геохимически подчиненных ландшафтов (лайды, приозерных понижений, озерных котловин и речных долин) увеличивается доля пылевой и илистой фракций, происходит утяжеление гранулометрического состава.

Наблюдается значительное варьирование кислотно-щелочных условий (рН = 3,2–8,3). Преобладают кислые и слабокислые почвы: псаммоземы имеют среднее значение рН = 4,6, глееземы — 4,8. Только в засоленных почвах лайды реакция изменяется от близкой к нейтральной до щелочной, среднее значение рН = 6,9 (см. табл. 3). Сдвиг реакции засоленных арктических почв в щелочной диапазон был отмечен ранее в [1], увеличение значения рН связано с большим количеством обменного натрия.

Солевой состав водных вытяжек изменяется в зависимости от положения в миграционном ряду. Минерализация водной вытяжки из почв автономных водораздельных ландшафтов (1–2, см. табл. 1)

Таблица 3

#### Состав почв о. Белый

Показатель	Геохимический ландшафт (см. табл. 1)								
	1 (n = 2)	2 (n = 6)	3 (n = 4)	4 (n = 3)	5 (n = 3)	6 (n = 1)	7 (n = 3)	8 (n = 3)	9 (n = 1)
Физический песок, %	96,2	89,5	95,0	91,7	93,5	99,7	83,4	80,9	71,4
Физическая глина, %	3,8	10,5	5,0	8,3	6,5	0,3	16,6	19,1	28,6
Песчаная фракция, %	86,1	60,5	83,6	68,4	69	99,4	54,1	40,3	31,2
Пылевая фракция, %	13,2	37,8	15,5	30,3	29,9	0,6	43,1	56,4	64,3
Илистая фракция, %	0,7	1,7	0,9	1,3	1,1	0	2,8	3,3	4,5
рН	5,1	4,7	4,4	5,0	5,0	4,4	5,1	6,9	5,6
ТС, %	0,67	3,20	1,07	1,60	2,82	0,29	2,50	1,39	7,29
TNb, %	0,15	0,42	0,16	0,26	0,56	0,02	0,35	0,44	1,46
ТС:TNb	4,6	8,1	6,7	6,2	5,2	15,4	7,2	3,2	5,0
Mn	<u>252</u>	<u>248</u>	<u>214</u>	<u>287</u>	<u>213</u>	<u>397</u>	<u>312</u>	<u>484</u>	<u>352</u>
	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,6	0,4
Cu	<u>1,2</u>	<u>5,3</u>	<u>1,8</u>	<u>2,6</u>	<u>7,8</u>	<u>1,0</u>	<u>7,2</u>	<u>9,8</u>	<u>18,3</u>
	0,1	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,4	0,5	0,9
Zn	<u>12,9</u>	<u>28,9</u>	<u>12,5</u>	<u>21,1</u>	<u>29,5</u>	<u>9,5</u>	<u>43,5</u>	<u>70,0</u>	<u>92,0</u>
	0,3	0,6	0,3	0,4	0,6	0,2	0,9	1,4	1,8
Cd	<u>1,9</u>	<u>1,5</u>	<u>1,1</u>	<u>0,3</u>	<u>0,3</u>	<u>0,8</u>	<u>1,5</u>	<u>0,6</u>	<u>0,1</u>
	3,8	3,0	2,2	0,6	0,6	1,6	3,0	1,2	0,2
Fe	<u>7920</u>	<u>12 799</u>	<u>15 223</u>	<u>9487</u>	<u>14 588</u>	<u>6612</u>	<u>17 756</u>	<u>25 632</u>	<u>33 174</u>
	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,5	0,7	0,9
Cr	<u>21</u>	<u>32</u>	<u>13</u>	<u>29</u>	<u>49</u>	<u>9</u>	<u>48</u>	<u>71</u>	<u>106</u>
	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,05	0,2	0,4	0,5
Hg	<u>0,011</u>	<u>0,033</u>	<u>0,018</u>	<u>0,022</u>	<u>0,018</u>	<u>0,012</u>	<u>0,036</u>	<u>0,033</u>	<u>0,073</u>
	0,4	0,1	0,6	0,7	0,6	0,4	1,2	1,1	2,4

Примечание. Здесь и в табл. 4: n – количество проанализированных проб; для микроэлементов и Fe: числитель – среднее значение (мг/кг), знаменатель – кларк концентрации по отношению к кларку почв [16].

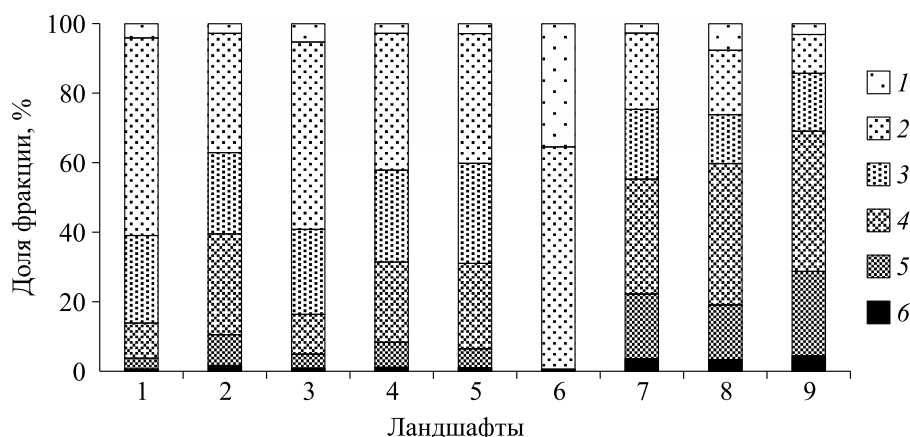


Рис. 2. Гранулометрический состав почв различных ландшафтов (см. табл. 1).

Размер фракций, мм: 1 – 0,25–0,5; 2 – 0,10–0,25; 3 – 0,05–0,10; 4 – 0,01–0,05; 5 – 0,002–0,01; 6 – <0,002.

меньше 0,1 %, почвы относятся к незасоленным. Минимальная концентрация отмечена в песчаных почвах водоразделов (0,012 %), которые содержат солей значительно меньше, чем породы, на которых они сформировались. Исследование водных вытяжек четвертичных отложений о. Белый показало, что степень засоления пород сильная (суммарное содержание солей 0,4–0,8 %) и очень сильная (>0,8 %), тип засоления – хлоридный [9]. Рассоление почв связано с воздействием ультрапресных атмосферных осадков, минерализация которых на территории Ямала в среднем составляет 0,03 г/л [17]. Интенсивный вынос растворимых веществ из рыхлой толщи – закономерное следствие избыточного переувлажнения, характерного для холодно-влажных областей [18].

В почвах подчиненных ландшафтов (речных долин, приозерных понижений (ландшафты 5 и 7, см. табл. 1)) суммарное содержание водорастворимых солей увеличивается по сравнению с автономными и составляет 0,09–0,37 %. В транссупераквальных ландшафтах долин, т. е. открытых аккумулятивных звеньев миграционных рядов, почвы содержат существенно меньше водорастворимых солей, чем в супераквальных ландшафтах приозерных понижений – замкнутых ландшафтно-геохимических арен (табл. 4). Активная водная миграция солей и их накопление в подчиненных ландшафтах типичны для арктических тундр [1].

В почвах лайды (ландшафты 6 и 8, см. табл. 1) содержание водорастворимых солей сильно варьирует – от 0,026 до 1,7 %. В наибольшей степени засолены почвы на низком уровне, где содержание солей превышает 1 %, минимально содержание солей в псаммоземах возвышенных притеррасных участков лайды (ландшафт 6, см. табл. 1), промытых атмосферными осадками. Низкая концентрация солей в поверхностном горизонте псаммоземов незатапливаемой лайды контрастирует с высоким содержанием в отложениях, на которых они сформированы. По данным [9], суммарное содержание водорастворимых солей в современных морских осадках на о. Белый составляет 0,149–0,526 %, т. е. на один математический порядок больше, чем в исследованных почвах лайды.

Таблица 4

Ионно-солевой состав (%-экв.) водных вытяжек почв о. Белый

Ионный состав	Геохимический ландшафт (см. табл. 1)									Атмосферные осадки Ямала [17]
	1 (n = 2)	2 (n = 6)	3 (n = 4)	4 (n = 3)	5 (n = 3)	6 (n = 1)	7 (n = 3)	8 (n = 3)	9 (n = 1)	
Mg <sup>2+</sup>	12	14	11	6	10	9	6	7	11	10,5
Ca <sup>2+</sup>	27	30	27	14	18	13	9	7	14	23,3
Na <sup>+</sup>	58	52	58	78	68	72	82	82	71	66,2
K <sup>+</sup>	2	4	4	3	3	6	3	3	4	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	47	44	38	46	39	10	27	2	10	48
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9	13	8	14	31	14	14	25	53	10,7
Cl <sup>-</sup>	44	43	54	40	30	76	59	74	36	41,3
Минерализация, %	0,012	0,024	0,019	0,017	0,09	0,026	0,37	1,26	0,19	0,003

Ионный состав водных вытяжек также зависит от положения в миграционном ряду. В геохимически автономных ландшафтах водоразделов и склонов (1–4, см. табл. 1) водные вытяжки в большинстве случаев относятся к гидрокарбонатному классу и по ионному составу близки к атмосферным осадкам (см. табл. 4). В подчиненных ландшафтах приозерных понижений и лайды (6–8) вытяжки относятся к хлоридному классу. В субаквальном озерном ландшафте (9) состав водной вытяжки сульфатный. Среди катионов во всех пробах отмечено преобладание натрия. Максимально содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в автономных ландшафтах, где натрий вымыт атмосферными осадками.

Большое значение для формирования ландшафтно-геохимической структуры территории имеет накопление элементов на биогеохимическом барьере, активно образующемся на плоских слабореннированных морских террасах, в приозерных и приречных низинах, где содержание углерода (ТС) в почвах составляет 2,5–3,2 %. Наибольшее значение ТС зафиксировано в аккумулятивном субаквальном ландшафте (9, см. табл. 1), где накапливаются детрит и торф из прилегающих почв (см. табл. 3). Содержание общего азота зависит от гранулометрии пород: 0,15–0,16 % — в псаммоземах водоразделов и склонов, 0,26–0,42 % — в глееземах и 1,46 % — в озерных отложениях с максимальным содержанием илистых и пылеватых частиц. Судя по соотношению углерода и связанного азота (ТС:ТNб), биогеохимический круговорот наиболее интенсивен в ландшафтах приморской лайды вследствие быстрого разложения остатков разнотравья и осок, доминирующих в составе фитоценозов.

Данные, представленные в [10, 11], свидетельствуют о низком содержании микроэлементов (Cu, Cr, Mn, Pb, Zn) в почвах о. Белый. Полученные нами результаты также показали, что содержание большинства химических элементов в почвах о. Белый существенно ниже кларка почв (см. табл. 3). Среднее значение кларка концентрации (КК) для Cr — 0,2; Cu — 0,3; Mn и Fe — 0,4; Zn — 0,7; Hg — 0,9. Содержание Pb, Co было ниже предела обнаружения (0,5 мг/кг) более чем в 50 % проб, что также свидетельствует о недостатке элементов. Накопление характерно только для Cd (КК = 2,1). Минимальное содержание элементов отмечено в псаммоземах водоразделов и высокой лайды, где, за исключением Cd, кларки концентрации составляют 0,1–0,4. Наблюдается тенденция к увеличению содержания элементов в почвах аккумулятивных ландшафтов. Содержание Zn, составляющее в почвах элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов 12,5–12,9 мг/кг, в аккумулятивных ландшафтах лайды увеличивается до 70 мг/кг, а в супераквальной озерной фации — до 92 мг/кг. Аналогичное распределение характерно для меди, содержание которой в почвах аккумулятивных ландшафтов по сравнению с элювиальными увеличивается в 2–8 раза, а в озерных отложениях — в 15.

Вычисление коэффициентов корреляции показало сильную положительную зависимость между содержанием илистой и пылевой фракций и концентрацией Cr, Zn, Cu, Hg ( $r = 0,71–0,90$ ). Слабее от гранулометрического состава зависит содержание Fe, Mn ( $r = 0,60–0,74$ ), не зависит — содержание Cd. Полученные результаты соответствуют выводам о достоверной связи содержания микроэлементов с количеством физической глины в породах, где в песчаных и пылеватых фракциях преобладает кварц [20]. Наблюдается достоверная корреляционная зависимость между содержанием в почвах Cu, Zn, Hg, Cr и количеством азота ( $r = 0,6–0,7$ ), что свидетельствует о биогенной аккумуляции. Таким образом, тенденция к увеличению содержания Mn, Cu, Zn, Fe, Cr, Hg в геохимически подчиненных ландшафтах определяется накоплением на сорбционном и биогеохимическом барьерах. Снижение величины pH приводит к уменьшению содержания Mn ( $r = 0,52$ ), что свидетельствует об увеличении подвижности в кислой среде.

Утяжеление гранулометрического состава почв подчиненных ландшафтов связано с процессами плоскостного смыва, выноса временными водными и грязевыми потоками. В тундрах Ямала содержание взвешенных частиц в водных потоках, размывающих оголенные поверхности, составляет 10–100 г/л [21]. Активный вынос илистой и пылевой фракций из почв подтверждается увеличением мутности воды тундровых рек в многоводные годы, что связано с термокарстом, термоэрозией, склоновыми процессами [22]. Отмечалось влияние склоновых криогенных процессов на увеличение содержания в почвах геохимически подчиненных ландшафтов Zn, Cu, Ni [23].

Важным фактором катенарной дифференциации химических свойств почв является различие окислительно-восстановительных условий. Поверхность морских террас о. Белый сильно увлажнена в тыловых и дренирована (до иссушенной) в прибровочных ее частях [13]. Соответственно, почвы плоских слабореннированных водоразделов и их склонов сильно различаются по редокс-потенциалу. В начальных звеньях катен — на водоразделах — преобладают ландшафты кислого глеевого класса. Средние звенья — дренированные склоны, сложенные песчаными породами, — отличаются относительно глубоким протаиванием и окислительными условиями в почвах. Анализ латеральной геохимической структуры показал, что в псаммоземах склоновых трансэлювиальных ландшафтов происходит аккумуля-

муляция на кислородном барьере Fe, Mn, Cr — катионогенных элементов, подвижных в глеевой обстановке и инертных в окислительной. Распределение этих элементов мало контрастно (величина коэффициента латеральной дифференциации  $L$  равна 1,3–1,6). Вынос характерен для халькофильных Cu, Zn, Hg ( $L = 0,7–0,9$ ), чему способствует небольшое содержание органического вещества. Концентрация общего углерода и азота в почвах трансэлювиальных ландшафтов (3 и 4, см. табл. 1) в 2–3 раза ниже, чем в почвах аккумулятивных ландшафтов.

В аккумулятивных ландшафтах (речных долинах, озерных поймах) господствует глеевая обстановка. Здесь отмечено накопление Cu, Hg, Fe ( $L = 1,3–1,6$ ). Доля илистой и пылеватой фракций увеличивается по сравнению с автономными ландшафтами в 4,9 и 2,5 раза соответственно, что свидетельствует о преобладающей роли сорбционного геохимического барьера в накоплении элементов. Для водораздельно-озерного сопряжения характерно резкое увеличение концентрации водорастворимых солей ( $L = 40,1$ ), рост содержания илистой и пылеватой фракций ( $L = 4,2$  и  $1,2$  соответственно) в аккумулятивных супераквальных ландшафтах приозерных понижений. Утяжеление гранулометрического состава приводит к повышению содержания Cr, Zn, Fe, Mn. Вместе с тем низкая концентрация общего углерода и азота и ослабление биогенной аккумуляции приводят к уменьшению содержания Cu и Hg.

В водораздельно-лайдовом геохимическом сопряжении в почвах аккумулятивных ландшафтов наблюдается повышенная концентрация Zn, Cu, Fe, Cr, Mn. Распределение элементов более контрастно, чем в описанных выше сопряжениях ( $L = 1,8–3,6$ ), что отличает прибрежные ландшафты от ландшафтов водораздельных тундр, где катенарная геохимическая контрастность аккумулятивных и транзитных ландшафтов, как правило, невысока, что следует из наших результатов и подтверждено исследованиями в других тундровых районах [24, 25]. Контрастное распределение в водораздельно-лайдовом сопряжении связано с низким содержанием элементов в псаммоземах автономных элювиальных ландшафтов, интенсивным выносом элементов в растворенной и взвешенной формах и наличием сорбционного геохимического барьера в почвах подчиненных ландшафтов. Накопление Zn, Cu и Hg в маршевых почвах связано также с осаждением на сульфидном барьере в сероводородной среде [26]. В целом анализ латеральной дифференциации указывает на активную миграцию Fe, содержание которого повсеместно повышено в почвах аккумулятивных ландшафтов (в 1,6–2,4 раза).

Радиальное распределение элементов имеет элювиально-иллювиальный характер, наиболее отчетливо выраженный в глееземах. В средней части профиля наблюдается минимальная концентрация Mn, Fe, Zn, Pb, в поверхностном органическом горизонте и в надмерзлотном слое содержание элементов увеличивается (рис. 3). Только для Cu отмечено регрессивное распределение, пропорциональ-

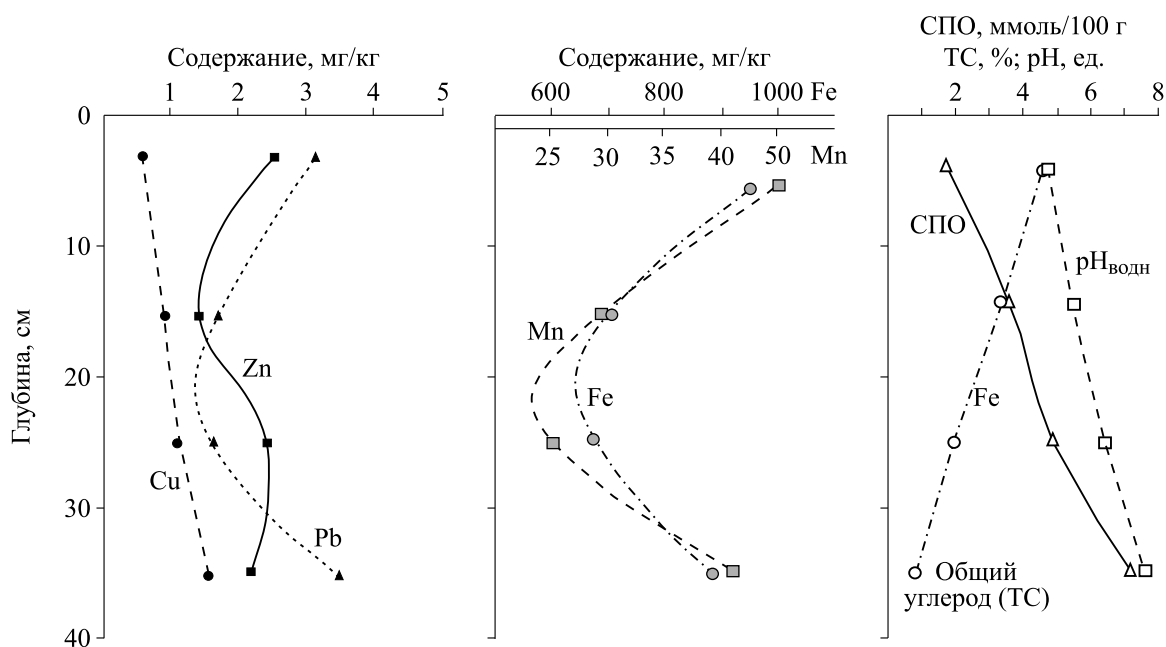


Рис. 3. Распределение подвижных форм микроэлементов (а), Fe и Mn (б), величины pH, общего углерода (ТС) и суммы поглощенных оснований (СПО) в профиле глеезема (северо-западная часть о. Белый).



Ряды радиальной дифференциации химических элементов в почвах о. Белый

Почвы	Слабое накопление ( $R = 1-2$ )	Рассеяние	
		слабое ( $R = 0,99-0,5$ )	среднее ( $R = 0,49-0,2$ )
Валовое содержание			
Глеезем	Mn <sub>2,0</sub> Zn <sub>1,2</sub> Pb <sub>1,1</sub>	Cu <sub>0,9</sub> Cd <sub>0,9</sub> Ni <sub>0,9</sub>	–
Псаммозем	Cu <sub>1,6</sub> Pb <sub>1,3</sub> Zn <sub>1,2</sub> Mn <sub>1,2</sub>	Ni <sub>0,9</sub> Cd <sub>0,7</sub>	–
Подвижные формы			
Глеезем	Fe <sub>1,1</sub>	Mn <sub>0,7</sub> Cu <sub>0,6</sub> Pb <sub>0,6</sub>	Zn <sub>0,4</sub> Ni <sub>0,4</sub>
Псаммозем	Zn <sub>1,3</sub> Mn <sub>1,1</sub> Fe <sub>1,1</sub>	Pb <sub>0,8</sub>	Ni <sub>0,4</sub> Cu <sub>0,4</sub>

Примечание. Прочерк – элементов среднего рассеяния не отмечено.

ное падению содержания углерода, росту СПО и величины рН с глубиной. Как отмечалось в [25], арктотундровым почвам свойственно повышение содержания подвижной формы металлов в органических горизонтах и нижней части профиля. Согласно [10], в профиле псаммозема о. Белый накопление Fe, Ti, Mn, Ni, Cr, Cu, Zn, V происходит в поверхностном (0–5 см) и надмерзлотном (45–54 см) горизонтах. Таким образом, радиальное распределение металлов зависит от биогенной аккумуляции и наличия мерзлотного водоупора.

Радиальная неоднородность проявляется в наибольшей степени для Zn, Mn, Pb, которые аккумулируются в поверхностных горизонтах как глееземов, так и псаммоземов (табл. 5). В поверхностных горизонтах псаммоземов также накапливается Cu. В тундрах Ямала к элементам активного накопления тундровой растительностью относятся Mn, Zn; сильного накопления — Pb, Cu [27], что определяет аккумуляцию этих элементов на биогеохимическом барьере. Наблюдается достоверная корреляционная зависимость между концентрацией Zn, Cu и содержанием азота ( $r = 0,6-0,7$ ). Распределение валового содержания элементов в профиле почв о. Белый мало контрастно, наблюдается либо слабое накопление, либо слабое рассеяние, средние значения  $R$  меняются от 0,8 (Cu) до 2,0 (Mn). Подвижные формы металлов распределены более контрастно из-за усиления рассеяния. Для Ni, Zn в глееземах и Ni, Cu в псаммоземах характерно среднее рассеяние ( $R = 0,4$ ). В псаммоземах отмечено слабое накопление в верхней части профиля подвижных форм Mn, Zn, Fe ( $R = 1,1-1,3$ ), в глееземах — слабое накопление Fe. В целом рассеяние подвижных форм преобладает над аккумуляцией, распределение валового содержания элементов мало контрастно, что свидетельствует о слабом проявлении биогенно-аккумулятивного процесса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своеобразие геохимической структуры ландшафтов о. Белый обусловлено морским генезисом засоленных почвообразующих пород, преобладанием песчаной фракции в гранулометрическом составе почв, различиями окислительно-восстановительных условий в почвах центральных частей водоразделов, склонов и приморской лайды, активной миграцией веществ, вызванной слабой выраженностью биогеохимического барьера.

Содержание водорастворимых солей в почвах зависит от генезиса пород и ландшафтно-геохимических условий. Отчетливо проявляется рассоление почв автономных ландшафтов и возрастание засоления почв аккумулятивных ландшафтов, особенно в условиях замкнутых ландшафтно-геохимических арен.

Содержание микроэлементов в почвах, за редким исключением, меньше кларка. Латеральная дифференциация катен связана с утяжелением гранулометрического состава и формированием сорбционного барьера в почвах аккумулятивных ландшафтов. В псаммоземах элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов, промытых атмосферными осадками, содержание пылеватых и илистых частиц минимально, что обусловило очень низкое содержание микроэлементов, кларк концентрации которых  $< 0,4$  (за исключением Cd). В почвах аккумулятивных ландшафтов (приозерных низин, речных пойм, лайды) отмечен рост содержания пылеватой и илистой фракций, что определяет накопление Zn, Cu, Fe, Cr, Hg на сорбционном барьере. Аккумуляция Cu, Zn, Hg также связана с биогенным накопле-

нием, а в затапливаемых приморских низинах осаждение этих элементов происходит и на сероводородном геохимическом барьере. В вертикальном профиле почв распределение микроэлементов зависит от биогенного накопления и аккумуляции подвижных форм в надмерзлотном горизонте.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-45-890312, 16-34-60010), гранта Санкт-Петербургского государственного университета Urbanized ecosystems of the Russian Arctic: dynamics, state and sustainable development и в рамках госзадания согласно Плану НИР Тюменского научного центра СО РАН на 2018–2020 гг. (0371–2018–0032).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Основные черты геохимии арктического почвообразования // Почвоведение. — 1994. — № 6. — С. 85–93.
2. АМАР Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2005, Oslo, Norway [Электронный ресурс]. — <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2002-heavy-metals-in-the-arctic> (дата обращения 25.01.2018).
3. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Изменение атмосферной циркуляции и загрязнения окружающей среды в Сибири от промышленных районов Норильска и Урала в начале XXI в. // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, № 6. — С. 527–534.
4. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в Арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 25, № 6. — С. 475–483
5. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. — М.: Высш. шк., 1988. — 328 с.
6. Глазовская М.А. Биогеохимическая организованность экологического пространства в природных и антропогенных ландшафтах как критерий их устойчивости // Изв. РАН. Сер. геогр. — 1992. — № 5. — С. 5–12.
7. Глазовская М.А., Касимов Н.С. Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. — 1987. — № 1. — С. 11–17.
8. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимическое районирование Западно-Сибирской равнины // География и природ. ресурсы. — 1990. — № 4. — С. 77–83.
9. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Региональная инженерная геология. — 2015. — № 1. — С. 50–72.
10. Томашунас В.М., Абакумов Е.В. Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. — 2014. — № 6. — С. 26–31.
11. Abakumov E., Shamilishviliy G., Yurtaev A. Soil polychemical contamination on Belyi Island as key background and reference plot for Yamal region // Polish Polar Research. — 2017. — Vol. 38 (3). — P. 313–332.
12. Moskovchenko D.V., Kurchatova A.N., Fefilov N.N., Yurtaev A.A. Concentrations of trace elements and iron in the Arctic soils of Belyi Island (the Kara Sea, Russia): patterns of variation across landscapes // Environmental Monitoring and Assessment. — 2017 [Электронный ресурс]. — <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-017-5928-0> (дата обращения 20.07.2018).
13. Слагода Е.А., Лейбман М.О., Хомутов А.В., Орехов П.Т. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море (Ч. 1) // Криосфера Земли. — 2013. — Т. 17, № 4. — С. 11–21.
14. Дружинин А.Н., Идрисов И.Р., Маршинин А.В. Опыт картографирования ландшафтов арктической тундры на примере северо-западной части острова Белый (Карское море) // Геоинформационное картографирование в регионах России: Материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. — Воронеж: Науч. кн., 2015. — С. 46–53.
15. Глазовская М.А., Касимов Н.С., Перельман А.И. Основные понятия геохимии ландшафтов, существенные для фонового мониторинга // Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — С. 8–25.
16. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 238 с.
17. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. — 1999. — Т. 3, № 2. — С. 40–65.
18. Таргульян В.О. Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. — М.: Наука, 1971. — 268 с.
19. Таргульян В.О. Почвенно-геохимическое районирование холодно-влажных областей севера Евразии // Растительность лесотундры и пути ее освоения. — Л.: Наука, 1967. — С. 13–19.
20. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 275 с.
21. Губарьков А.А. Взаимосвязь гидрологических и криогенных процессов в бассейнах малых рек и на побережье Карского региона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тюмень, 2009. — 16 с.
22. Губарьков А.А., Лейбман М.О. Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на центральном Ямале — результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли. — 2010. — Т. 14, № 1. — С. 41–49.

23. **Ukrainitseva N.G., Korobova E.M., Sizov E.I., Kolokolova A.A.** Heavy metals in soils of the landslide-affected Taimyr coast of the Yenisey Bay // Second AMAP International Symposium on Environmental Pollution of the Arctic. Rovaniemi, 1–4 October. — Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme. — 2002. — P-M31.
24. **Московченко Д.В.** Экогеохимия нефтедобывающих районов Западной Сибири. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2013. — 260 с.
25. **Добровольский В.В.** Геохимия почв Шпицбергена // Почвоведение. — 1990. — № 2. — С. 5–20.
26. **Перельман А.И., Касимов Н.С.** Геохимия ландшафта. — М.: Астрей-2000, 1999. — 763 с.
27. **Тентюков М.П.** Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры). — Сыктывкар: Изд-во Ин-та биологии Коми науч. центра УрО РАН, 2010. — 260 с.

*Поступила в редакцию 26.02.2018*

*После доработки 19.08.2018*

*Принята к публикации 19.09.2019*

---