

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 631.437:550.424

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-1-8

Использование показателя магнитной восприимчивости почв для оценки экологического состояния почвогрунтов г. Якутска

А.П. Чевычелов*, А.А. Алексеев, Л.И. Кузнецова

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

*chev.soil@list.ru

Аннотация. Впервые проведено определение объемной магнитной восприимчивости (ОМВ) техногенно-загрязненных почвогрунтов г. Якутск, сформированных на многолетнемерзлых породах и функционирующих в условиях криоаридного климата Центральной Якутии. Осуществлена магнитометрическая съемка на территории современного г. Якутск по произвольной сети наблюдений, выполнено 444 измерения ОМВ почвогрунтов малогабаритным измерителем КМ-7. Величины ОМВ почвогрунтов г. Якутск изменяются значительно, при среднем значении $163,5 \cdot 10^{-5}$ ед. Си предел изменения данного показателя $13,2-1220,0 \cdot 10^{-5}$ ед. Си составляет почти три порядка величин (10^3), что указывает на его высокую вариабельность, когда коэффициент вариации $V = 64$ %. Также значительно варьируют и средние величины ОМВ, полученные для почвогрунтов отдельных улиц и районов города, изменяясь от $80,3$ до $314,6 \cdot 10^{-5}$ ед. Си, т. е. почти в 4 раза. Была составлена гистограмма ОМВ почвогрунтов г. Якутск, когда весь массив данных был разбит на семь рангов или классов, с шагом, равным $50 \cdot 10^{-5}$ ед. Си. В результате основная масса всех величин (84 %) укладывалась в пределы значений до $250 \cdot 10^{-5}$ ед. Си, а на интервалы таковых $> 250 \cdot 10^{-5}$ ед. Си приходилось всего 16 % значений от общего количества измерений. По результатам проведенного исследования также было установлено, что суммарный показатель загрязнения изучаемых почвогрунтов тяжелыми металлами (Z_c) связан с показателем ОМВ сильной положительной ($r = 0,937$) статистически значимой ($n = 8$, $r_{st} = 0,707$, $p = 0,95$) корреляционной связью, практически приближающейся к линейной зависимости. Среднее значение ОМВ почвогрунтов г. Якутск сопоставимо с таковыми, определенными для промышленных районов г. Москва ($160-180 \cdot 10^{-5}$ ед. Си), г. Пермь ($183 \cdot 10^{-5}$ ед. Си), г. Медногорск ($158 \cdot 10^{-5}$ ед. Си), и в то же время значительно ниже величин, полученных для крупных промышленно развитых городов Китая, таких как Ханьчжоу и Лоян ($128 \cdot 10^{-5}$ ед. Си).

Ключевые слова: криолитозона, г. Якутск, техногенно-загрязненные почвогрунты, магнитная восприимчивость.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту (тема № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5).

Введение

Город Якутск – крупнейший населенный пункт, который расположен на территории со сплошной криолитозоной. В отличие от других городов России, построенных на многолетнемерзлых грунтах (Норильск, Воркута, Магадан), население в Якутске продолжает расти. Так, только за период 2000–2015 гг. численность населения

здесь выросла со 195,4 до 302 тыс. человек [1]. Рост Якутска сопровождался возникновением многих негативных факторов, ухудшающих его экологическую обстановку. В настоящее время в черте города практически не осталось естественных почв, они полностью замещены техногенными слоями или почвоподобными телами – урбаноземами [2, 3].

В настоящее время урбаноземы г. Якутск подвержены интенсивному, многофакторному, антропогенному и техногенному прессу. Одним из видов такого воздействия является аэротехногенное загрязнение данных почвогрунтов тяжелыми металлами (ТМ) [4, 5]. В районе Якутска полиэлементные техногенные аномалии формируются во всех природных средах: в атмосфере (газы, аэрозоли, пыль) – CO_2 , NO_2 , SO_2 , H_2S , Pb, Cu, Mn; поверхностных водах (реки, озера) – SO_4 , Cl, NH_4 , NO_2 , Cu, Sr, Mn; в почвенном покрове – Hg, Zn, Pb, Cr, Mn, Cu, Th, Cd, и распространяются далеко за пределы города [6].

Оценкой экологического состояния техногенно-загрязненных почвогрунтов г. Якутск занимались различные исследователи: геологи, почвоведы, экологи, что нашло свое отражение в ряде известных публикаций [4–10]. В частности, установлено, что основой полиэлементных аномалий городских почв Якутска являются такие ТМ, как Pb, Zn, Cu и Ni. Оценка почв по суммарному показателю загрязнения (Zc) выявила, что в целом территория города находится в пределах допустимого уровня загрязнения ($z < 16$) с локальными точками возмещения ($z > 32$), требующими дальнейших исследований [3, 5].

Проведено изучение содержания и распределения шести микроэлементов – ТМ, таких как Pb, Ni, Mo, Cr, Zn и Cu в черноземных почвах пригородной зоны г. Якутск на участках с техногенным, зоогенным и антропогенным воздействием. Установлено, что в целом на всех изученных площадках содержание ТМ в почвах ниже или несущественно превышает уровень предельно допустимых концентраций (ПДК). Поэтому данные элементы в настоящее время не представляют большой опасности для окружающей среды, тем более для живых организмов [4].

Отмечено повышение содержания как валовых, так кислоторастворимых форм Pb, Zn и Cu в поверхностном слое (0–20 см) мерзлотной лугово-черноземной почвы транспортной зоны «Аэропорт-Якутск» в 50-метровой полосе от источника загрязнения. При этом приоритетным загрязнителем является Pb, валовое содержание которого превышает ПДК в 3 раза. Если мерзлотная лугово-черноземная почва фонового участка, удаленного от автотрассы на 250 м, характеризовалась высоким ферментативным потенциалом, то в полосе загрязнения активность инвертазы падала приблизительно в 3–5 раз, фосфотазы – в 4–5, уреазы – в 3–4, каталазы – в 4–10, дегидрогена-

зы – в 2–4 раза соответственно по сравнению с фоном [7].

Также установлено, что в результате более чем 300-летнего освоения городской территории в г. Якутск сформировалась локальная биотехносфера. Накопление микроэлементов в техногенных городских грунтах связано с высоким содержанием в аллювиальных четвертичных отложениях W, B, Pb, Ti, Sn, Mo и Ag (в 1,0–2,0 раза по сравнению с КЗК – кларком земной коры) и их дефицитом для V, Co, Ni, Cu, La, Be и Hg, количество которых фиксируется на уровне значений $0,5 < \text{КЗК}$. Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к химическому составу отложений (> 5) свойственна макрокомпонентам Cl^- , NO_3^- , K^+ , Na^+ , NO_2^- , SO_4^{2-} и микроэлементу – ТМ Hg. При этом содержание микроэлементов в сезонно-талых примерно в 1,5 раза выше, чем в многолетнемерзлых грунтах культурного слоя (КС). Мощность техногенных геохимических ореолов в КС зависит от возраста освоения городской территории и достигает 8–10 м [8].

Проведено биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутск с использованием тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L. При этом оценивали всхожесть семян на 3, 4 и 14-е сутки, развитие надземной и подземной частей проростков, ингибирование тест-откликов и индекс токсичности фактора (ИТФ). Высокие показатели всхожести, развития надземной и подземной частей проростков были отмечены в контрольной пробе. Для городских почвогрунтов была характерна высокая вариабельность всех параметров. Большинство исследованных точек на территории г. Якутск характеризовались средней и низкой фитотоксичностью почв. Относительно высокая токсичность отмечалась в местах интенсивного движения автотранспорта и на улицах, где разрешен проезд грузовых автомобилей. Выявлена статистически значимая корреляционная зависимость исследуемых тест-откликов овса посевного от интенсивности автотранспортной нагрузки, более ярко выраженная при контактном биотестировании [9].

Также в последнее время было определено загрязнение атмосферы г. Якутск взвешенными веществами (ВВ), и с этой целью был изучен элементный, гранулометрический и минералогический состав ВВ в приземной атмосфере этого города. Установлено, что концентрация ВВ в воздухе города в течение десятилетнего периода

(2008–2018 гг.) постоянно превышала ПДК, при этом среднегодовые концентрации ВВ в течение этого времени были в 1,8 раза выше санитарных норм, в летний период – в 2,1, в зимний – в 1,6 раза. Поступающие в приземную атмосферу ВВ полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. Наиболее опасны средне-мелкодисперсные частицы (PM_{10}), составляющие около 10 % ВВ в атмосфере и способные проникать в глубокие отделы легких, вплоть до альвеол. Как в пылевых (>100 мкм), так и в средне-мелкодисперсных (10–100 мкм) ВВ присутствуют токсичные микроэлементы – ТМ, такие как Mn, Co, Cu, Cd, Pb, Zn. Особенно неблагоприятны с санитарно-экологической точки зрения средне-мелкодисперсные частицы с высоким содержанием элементов 1 и 2 классов токсичности Cd, Pb и Cu, формирующие аномалии в приземной атмосфере ряда районов города [10].

Магнитная восприимчивость (МВ) почв является интегральным показателем, который применяется в почвоведении при решении почвенно-генетических, почвенно-экологических и палеопочвенных задач [11, 12]. Особенно успешно данный показатель в последнее время используется у нас в России [13–19] и зарубежом [20–22] для оценки техногенного загрязнения почв и городских почвогрунтов ТМ. В частности, подобные исследования в России проведены на территории таких городов, как Москва [13, 23], Пермь [14, 17], Медногорск (Оренбургская область) [18] и других. Для оценки степени загрязнения почвогрунтов г. Якутск ТМ подобный подход применяется впервые.

Целью проведенных исследований являлась количественная оценка степени техногенного загрязнения почвогрунтов г. Якутск ТМ посредством измерения их МВ малогабаритным каппаметром в полевых условиях.

Объекты и методы исследований

Климат г. Якутск и его окрестностей резкоконтинентальный и засушливый с длительной, крайне морозной и малоснежной зимой, с коротким относительно жарким и засушливым летом. При этом среднемесячная температура июля составляет 18,7 °С, января – –43,2 °С, среднегодовая температура – –10,3 °С, среднегодовое количество осадков – 234 мм, количество осадков за вегетационный период – 143 мм, испаряемость – 502 мм, коэффициент увлажнения – 0,3, коэффициент континентальности – 302 и сумма актив-

ных температур – 1565 °С [24]. В целом в течение года в Якутске преобладают ветры северного и северо-восточных направлений [25]. Территория города характеризуется наличием криолитозоны, которая в среднем составляет 250–350 м [1].

Объектами исследований являлись техногенно-загрязненные почвогрунты, сформированные на современной территории г. Якутск (рис. 1). В полевой период 2020 г. всего было осуществлено 444 измерения объемной магнитной восприимчивости, или способности к намагничиванию [11, 26], данных почвогрунтов малогабаритным каппаметром КМ-7. КМ-7 является усовершенствованной версией каппаметра КТ-6 чешского производителя StatisGeo, который характеризуется высокой чувствительностью ($1 \cdot 10^{-6}$ ед. Си) и превосходной точностью измерений.

Магнитометрическая съемка на территории г. Якутск проводилась по произвольной сети наблюдений. При этом измерениями были охвачены почвогрунты, преимущественно развитые вдоль автомобильных городских и пригородных дорог конкретных улиц, формирующие газоны, зеленые зоны, перекрестки, разделительные полосы между проезжей частью и тротуарами, и в меньшей степени внутригородские территории данного муниципального образования (рис. 2). В точках, составляющих сеть мониторинговых наблюдений, измерения ОМВ проводилось в 3-кратной повторности с площади поверхности почвогрунтов размером $1 \cdot 1$ м ($S = 1$ м²).

В качестве картографических материалов (топокарты, космоснимки) использовались материалы Атласов г. Якутск [27, 28]. Географические координаты (широта – N° с.ш. и долгота – E° в.д.) точек измерения определялись с помощью спутникового приемника-навигатора GPS-e Trax Vista. При этом погрешность определения географических координат местности при работе в режиме DGPS (USGC) составляла 3–5 м с вероятностью $p = 0,95$ (95 %). Математическая обработка результатов исследований производилась посредством применения методов вариационно-статистического, корреляционного и регрессионных анализов, принятых в почвоведении [29]. При этом использовался стандартный пакет программ Microsoft Excel 2007.

Результаты и обсуждение

Величины ОМВ почвогрунтов г. Якутск изменяются значительно, при $\min = 13,2$, $\max = 1220,0$ и среднем значении $163,5 \cdot 10^{-5}$ ед. Си предел из-

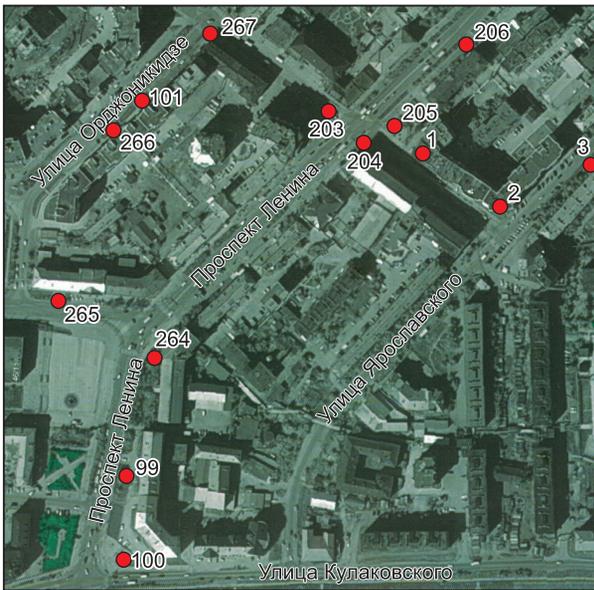


Рис. 2. Точки измерения ОМВ почвогрунтов в центральной части г. Якутск.

Fig. 2. Measurement points of VMS in soils in the central part of Yakutsk.

нов города, изменяясь от 80,3 до $314,6 \cdot 10^{-5}$ ед. Си, т. е. почти в 4 раза. При этом минимально загрязненными ТМ, помимо зеленых зон, оказались почвогрунты улиц Кирова, Чайковского, Хабарова, Лермонтова, Орджоникидзе, просп. Ленина, Окружного шоссе, а также районов Птицефабрики и ДСК. Здесь уровень техногенного загрязнения ТМ оказался ниже такового, характерного для города в целом. И наоборот, степень техногенного загрязнения почвогрунтов ТМ оказалось выше средней по городу для таких улиц, как Вилюйский переулок, Ярославского, Автодорожная, Чернышевского, Московской набережной, Покровского тракта и автострады 50 лет Октября. Особенно высокие максимальные значения ОМВ ($416,1\text{--}543,6 \cdot 10^{-5}$ ед. Си) характерны для почвогрунтов улиц Чернышевского, Автодорожной и Московской набережной, где отмечается более интенсивное движение грузового транспорта. Это подтверждает ранее сделанные выводы других авторов, полученные посредством биотестирования фитотоксичности почвогрунтов г. Якутск [9]. Среднее значение ОМВ почвогрунтов Вилюйского переулка ($169,8 \cdot 10^{-5}$ ед. Си) почти равно таковому, отмечаемому для города в целом. Данная улица, пересекающая центральную часть г. Якутск в северном направлении, по сути, представляет минисрез всего города, где

предел изменения данного показателя составляет $14,7\text{--}581,3 \cdot 10^{-5}$ ед. Си (изменяется почти в 40 раз), при высокой вариабельности ($V = 78\%$). Самое высокое значение ОМВ почвогрунтов было отмечено нами на территории металлобазы по ул. 50 лет Советской Армии и составляло $1220,0 \cdot 10^{-5}$ ед. Си (табл. 1).

С целью ранжирования всего массива данных ОМВ изучаемых почвогрунтов мы построили гистограмму, где по оси ординат приведена частота встречаемости ($P, \%$) определенного интервала значений данного показателя. С этой целью весь массив данных ($n = 444$) был разбит на семь рангов, или классов, с шагом, равным $50 \cdot 10^{-5}$ ед. Си. В результате получилось, что основная масса (84 %) всех значений ОМВ почвогрунтов г. Якутск укладывалась в интервалы значений до $250 \cdot 10^{-5}$ ед. Си. На интервалы значений $>250 \cdot 10^{-5}$ ед. Си приходилось всего 16 % таких от общего количества измерений (рис. 3).

С целью установления возможной связи между суммарным показателем техногенного загрязнения (Z_c) изучаемых почвогрунтов ТМ и показателем ОМВ нами было проведено специальное сравнительное исследование с привлечением соответствующих работ наших предшественников [3, 5] (табл. 2). По результатам данного исследования оказалось, что показатель Z_c связан с показателем ОМВ сильной положительной ($r = 0,937$) статистически значимой ($n = 8$, $r_{st} = 0,707$, $p = 0,95$) корреляционной связью, практически приближающейся к линейной зависимости. Это в целом соответствует результатам, полученным другими авторами при проведении подобных исследований. Так, в центральной части Англии, в районе расположения металлургических и химических заводов, на загрязненных землях была установлена высокая корреляция магнитной восприимчивости с содержанием в почве меди ($r = 0,73$), свинца ($r = 0,73$) и цинка ($r = 0,73$) [15]. Аналогичные положительные статистически достоверные ($n = 62$, $p = 0,99$) корреляционные связи были выявлены для верхнего слоя техногенно-загрязненных почв г. Пермь и соответственно составляли для Ni $r = 0,71$, Zn $r = 0,59$ и Cr $r = 0,63$ [14].

Последнее позволило нам, основываясь на уравнениях линейной регрессии, связать данные показатели линейной связью. Если принять за y показатель Z_c , а за x — показатель ОМВ, то получим соответствующие уравнения:

$$x = r \cdot S_x / S_y (y - y_{cp}) + x_{cp} \quad \text{и} \quad y = r \cdot S_y / S_x (x - x_{cp}) + y_{cp}.$$

Статистические показатели изменения ОМВ почвогрунтов г. Якутск

Statistical indicators of changes in VMS of soils in Yakutsk

№ п/п Number	Название улиц, районов города Name of streets and districts of the city	<i>n</i>	lim	$\bar{x} \pm S_x$	S	V
1	Парк культуры и отдыха Park of culture and recreation	5	24,3–132,1	80,3±19,7	43,3	54
2	Ул. Кирова Kirov street	10	28,7–206,3	119,5±16,0	51,1	43
3	Район Птицефабрики Poultry farm district	9	35,9–229,0	123,1±21,9	65,6	53
4	Ул. Чайковская Tchaikovsky street	8	73,2–193,4	123,1±15,5	43,3	35
5	Ул. Хабарова Khabarov street	14	50,9–179,0	129,9±10,0	36,9	28
6	Ул. Лермонтова Lermontov street	18	32,3–255,5	135,3±14,2	59,5	44
7	Окружное шоссе County highway	12	34,6–392,1	142,9±30,1	105,2	74
8	Пр. Ленина Lenin avenue	35	67,4–335,7	146,5±10,8	64,0	44
9	Ул. Орджоникидзе Ordzhonikidze street	15	82,0–226,4	147,4±11,9	46,6	32
10	Район ДСК DSC district	16	54,0–263,8	151,8±13,3	53,1	35
11	Виллюйский переулок Vilyuysky lane	24	14,7–581,3	169,8±34,6	133,2	78
12	Покровский тракт Pokrovsky tract	10	89,0–285,5	172,4±17,5	56,0	32
13	Автострада 50 лет Октября Freeway 50 years of October	13	107,6–327,7	215,2±25,7	92,4	43
14	Ул. Ярославского Yaroslavsky street	8	149,4–334,3	225,5±25,1	70,3	31
15	Ул. Автодорожная Road map street	14	102,8–543,6	230,0±27,6	102,3	44
16	Ул. Чернышевского Chernyshevsky street	27	49,9–416,1	235,0±17,7	91,9	39
17	Московская набережная Moskovskaya embankment	11	219,9–432,6	314,6±16,4	54,1	17
18	В целом по городу In the whole city	444	13,2–1220,0	163,5±4,9	104,3	64

Примечание. Здесь и далее: *n* – объем выборки; lim – пределы изменения содержания; $\bar{x} \pm S_x$ – среднее и его ошибка; S – стандартное отклонение; V – коэффициент вариации.

Note. Here and further: *n* – volume of sample; lim – limits of content change; $\bar{x} \pm S_x$ – mean and error of mean; S – standard deviation; V – coefficient of variation.

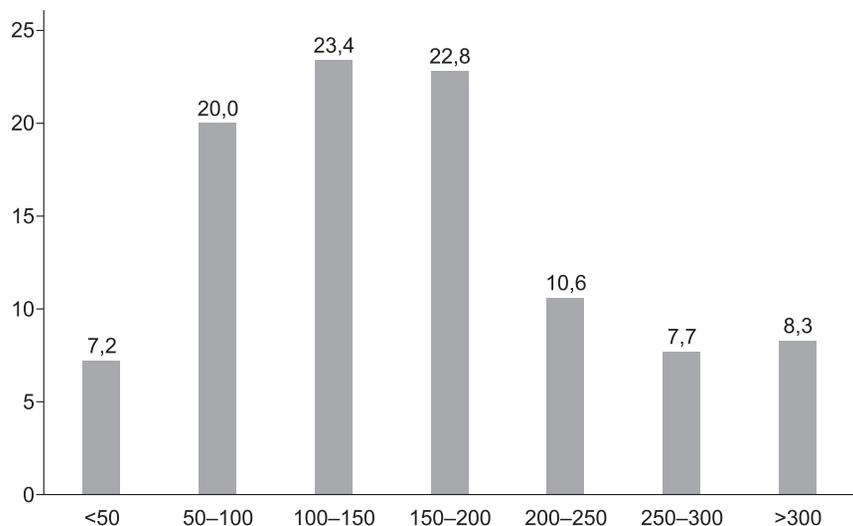


Рис. 3. Гистограмма ОМВ ($n \cdot 10^{-5}$ ед. Си) почвогрунтов г. Якутск.

Fig. 3. VMS histogram ($n \cdot 10^{-5}$ units Si) soils of Yakutsk.

При этом $r = 0,937$; $x_{\text{ср}} = 118,25$; $S_x = 48,47$; $y_{\text{ср}} = 53,15$ и $S_y = 30,93$. Подставив в данные формулы численные значения данных статистических величин, получим соответствующие уравнения линейной связи для x и y . Так, в нашем случае $x = 1,47y + 40,1$ или приблизительно $x = 1,5y + 40$. Из этого уравнения следует, что ранговым значениям показателя Z_c соответствуют следующие величины ОМВ: 16–64, 32–88 и 128–232 $\cdot 10^{-5}$ ед. Си. Таким образом, согласно ранжированию техногенного загрязнения почвогрунтов г. Якутск ТМ, точки со значениями ОМВ $<64-88 \cdot 10^{-5}$ ед. Си попадают в категории допустимого и умеренного загрязнений, а таковые со значениями 88–232 и $>232 \cdot 10^{-5}$ ед. Си уже относятся к категориям опасного и чрезвычайно опасного загрязнений [3, 5].

По нашим данным, в настоящее время Якутск является единственным городом, сформированным и функционирующим на многолетнемерзлых породах, где произведена оценка состояния почвогрунтов посредством определения их ОМВ. В этом плане представляет несомненный интерес сопоставление наших данных с таковыми, полученными другими авторами для промышленно-развитых городов России и зарубежья (табл. 3). Среднее значение ОМВ почвогрунтов г. Якутск ($163 \cdot 10^{-5}$ ед. Си) сопоставимо с таковыми, определенными для отдельных промышленных районов г. Москва ($160-180 \cdot 10^{-5}$ ед. Си), г. Пермь ($183 \cdot 10^{-5}$ ед. Си) и г. Медногорск ($158 \cdot 10^{-5}$ ед. Си), и в то же время значительно выше крупных про-

мышленно-развитых городов Китая, таких как Ханьчжоу и Лоян ($128 \cdot 10^{-5}$ ед. Си). Отметим, что города Москва, Ханьчжоу и Лоян являются городами-многомиллионниками (численность населения на 01.01.2020 г. изменяется в пределах 6,547–12,678 млн чел.), а количество населения г. Пермь – более 1 млн чел. [30, 31]. И одновременно данные мегаполисы являются крупными промышленными агломерациями. Якутск, в противовес этому, с населением (на 01.01.2020 г.) 322 987 чел., не имеет на своей территории крупных промышленно-развитых предприятий. Вследствие этого необходимо констатировать, что в силу ландшафтно-климатических особенностей природной среды г. Якутск техногенное загрязнение городских почвогрунтов во времени происходит более интенсивно в условиях меньшей техногенной нагрузки, чем в других немерзлых регионах России и зарубежья. Вероятно также, что самоочищение данных почвогрунтов здесь в условиях криоаридного климата Центральной Якутии происходит значительно медленнее. Это заставляет изыскивать приемлемые приемы снижения техногенной нагрузки на исследуемые почвогрунты. В настоящее время, по нашему мнению, таковыми приемами являются перевод городского автотранспорта на экологически более чистое газообразное топливо и уборка с городской территории с последующим безопасным складированием снега в зимний период. Период с устойчивым снежным покровом в

**Характеристика техногенного загрязнения почвогрунтов г. Якутск ТМ
по значениям суммарного показателя (Zc) и ОМВ (χ)**

Table 2

**Characteristics of technogenic pollution of soils of Yakutsk NM
by the values of the total index of contamination (Zc) and VMS (χ)**

N п/п Number	Название улиц и районов города Name of streets and districts of the city	Zc – образующие элементы Zc – forming elements	Zc	Источник Resource	$\chi, n \cdot 10^{-5}$ ед. Си $\chi, n \cdot 10^{-5}$ units SI
1	Перекресток улиц Короленко–пр. Ленина The intersection of Korolenko st.–Lenin avenue	Pb _{13,1} →Zn _{7,5} →Cd _{1,8}	22,4	[3, С. 19, табл. 2] [3, P. 19, table 2]	73,8
2	Перекресток улиц Курашова–пр. Ленина The intersection of Kurashov st.–Lenin avenue	Zn _{18,3} →Pb _{4,8} →Cd _{4,0}	29,0	[3, С. 19, табл. 2] [3, P. 19, table 2]	75,6
3	Район Птицефабрики Poultry farm district	Zn _{7,7} → Pb _{4,6} →Ni _{4,2}	31,9	[5, С. 35, табл. 3] [5, P. 35, table 3]	88,1
4	Перекресток улиц Октябрьская–пр. Ленина The intersection of Oktyabrskaya st.–Lenin avenue	Zn _{23,7} →Pb _{8,9} →Cd _{3,5}	38,5	[3, С. 19, табл. 2] [3, P. 19, table 2]	95,3
5	Перекресток улиц Кальвица–Дзержинского The intersection Kalvitsa st.–Dzerzhinskiy st.	Pb _{24,8} →Cd _{6,7} → Zn _{5,1}	45,5	[5, С. 35, табл. 3] [5, P. 35, table 3]	113,5
6	Перекресток улиц Ильменская–Чайковского The intersection Ilmen st.–Tchaikovsky st.	Pb _{23,2} →Cu _{18,5} → Cd _{7,5}	57,6	[3, С. 19, табл. 2] [3, P. 19, table 2]	130,0
7	Ул. 50 лет Советской Армии 50 years of the Soviet Army st.	Zn _{77,6} → Pb _{17,3}	98,4	[5, С. 35, табл. 3] [5, P. 35, table 3]	151,8
8	Свалка снега на объездном шоссе Snow dump on bypass highway	Zn _{76,9} → Cr _{15,7} → Cd _{5,6}	101,9	[3, С. 19, табл. 2] [3, P. 19, table 2]	217,9

Примечание. Zc – суммарный показатель загрязнения.

Note. Zc – total index of contamination.

Якутске составляет большую часть календарного года и длится около 7 месяцев [25].

Для оценки степени техногенного загрязнения почвогрунтов посредством определения их ОМВ в свое время было предложено отношение $\chi_{\text{изм}}/\chi_{\text{фон}}$, где $\chi_{\text{изм}}$ – измеренное значение ОМВ, а $\chi_{\text{фон}}$ – фоновая величина. При этом если данное отношение составляет 1,2–1,3, то загрязнение характеризуется как умеренное, а если в пределах 1,8–2,0 – то уже как сильное [32]. Впоследствии сотрудниками лаборатории геоэкологии Саратовского государственного университета данная

величина была охарактеризована, как коэффициент магнитности (Kmag), а его ранжирование по степени техногенного загрязнения определено более подробно. Так при Kmag = 0–1 степень техногенной трансформации является допустимой, при 1–3 – умеренной, 3–5 – опасной и более 5 – чрезвычайно опасной [33]. В соответствии с данной шкалой мы ранжировали весь массив данных (n = 444) по ОМВ почвогрунтов г. Якутск (табл. 4). При этом за фоновую величину ОМВ для г. Якутск было принято значение ОМВ, равное $80 \cdot 10^{-5}$ ед. Си. Большая часть полученных дан-

**Статистические показатели ОМВ почвогрунтов ($n \cdot 10^{-5}$ ед. Си)
отдельных городов России и Зарубежья**

Table 3

**Statistical indicators of soil VMS ($n \cdot 10^{-5}$ units Si)
individual cities of Russia and Abroad**

N п/п Number	Город, район City, district	Страна Country	\bar{x} mean	min minimum	max maximum	Источник Resource
1	Москва, Киевский вокзал Moscow, Kievsky railway station	Россия Russia	240	50	510	[13]
2	Москва, завод «Серп и молот» Moscow, plant «Sickle and hammer»	-/-	180	110	290	-/-
3	Москва, промзона завода ЗИЛ Moscow, industrial zone of the ZIL plant	-/-	180	30	370	-/-
4	Москва, промзона Донская M., Donskaya industrial zone	-/-	160	60	190	-/-
5	Пермь Perm	-/-	183	7	1931	[17]
6	Медногорск Mednogorsk	-/-	158	36	941	[18]
7	Ханьчжоу Hangzhou	Китай China	128	–	914	[20]
8	Лоян Luoyang	Китай China	128	–	1128	[21]
9	Якутск Yakutsk	Россия Russia	163	13	1220	Наши данные Our data

Таблица 4

**Степень техногенной трансформации почвогрунтов г. Якутск
в зависимости от значений коэффициента магнитности (K_{mag})**

Table 4

**The degree of technogenic transformation of Yakutsk soils depending
on the values of the magnetic coefficient (K_{mag})**

Значения K_{mag} Values of K_{mag}	Степень техногенной трансформации почвогрунтов The degree of anthropogenic transformation of soils	Количество измерений Number of measurements	
		число (n) number (n)	в % от общего количества in % of the total number
0–1	Допустимая Acceptable	73	16,5
1–3	Умеренная Moderate	298	67,1
3–5	Опасная Dangerous	65	14,6
Более 5	Чрезвычайно опасная Extremely dangerous	8	1,8

**Значения ОМВ (χ) отдельных точек мониторинговой сети наблюдений
за состоянием почвогрунтов г. Якутск, 2020 г.**

**OMV values (χ) of individual points of the monitoring network
of observations of the state of soils in Yakutsk, 2020**

№ п/п Number	Название улиц, районов города Name of streets and districts of the city	Географические координаты Geographic coordinates	χ , $n \cdot 10^{-5}$ ед. Си χ , $n \cdot 10^{-5}$ units Si	Kmag Values of Kmag
Минимальные Minimum				
1	Ул. Лермонтова, парк культуры и отдыха Lermontov st., park of culture and recreation	62°02'1,32"N, 129°43'4,31"E	22,7	0,3
2	Ул. Очиченко, Якутский хлебокомбинат Ochichenko st., Yakut bakery	62°03'53,56"N, 129°45'12,40"E	55,3	0,7
3	Ул. Ойунского, стадион «Юность» Oyunского st., Yunost stadium	62°01'14,37"N, 129°42'14,35"E	72,3	0,9
4	Перекресток улиц Лермонтова–Петра Алексеева The intersection of Lermontov st.–Peter Alexeyeva st.	62°02'25,96"N, 129°43'50,05"E	80,5	1,0
5	Вилуйский переулок, сосновый бор Vilyuysky lane, sosnovy bor	62°02'37,48"N, 129°40'52,77"E	80,5	1,0
Средние Medium				
6	Перекресток улиц Ойунского–Петровского The intersection of Oyunsky st.–Petrovsky st.	62°01'29,26"N, 129°42'39,01"E	147,5	1,8
7	Сергеляхское шоссе Sergelyakhskoe highway	62°00'25,30"N, 129°37'14,69"E	165,5	2,1
8	Ул. Ярославского Yaroslavsky st.	62°01'29,87"N, 129°43'46,76"E	194,8	2,4
9	Вилуйский переулок Vilyuysky lane	62°02'22,09"N, 129°41'24,39"E	198,1	2,5
10	Ул. Чернышевского Chernyshevsky st.	61°59'56,07"N, 129°42'46,92"E	220,5	2,8
Максимальные Maximum				
11	Автострада 50 лет Октября Freeway 50 years of October	62°03'56,60"N, 129°44'28,47"E	285,1	3,6
12	Вилуйский переулок Vilyuysky lane	62°02'21,72"N, 129°41'19,98"E	310,8	3,9
13	Ул. Чернышевского Chernyshevsky st.	62°00'15,33"N, 129°42'59,43"E	368,8	4,6
14	Московская набережная Moskovskaya embankment	62°01'32,24"N, 129°44'38,13"E	375,2	4,7
15	Сергеляхское шоссе Sergelyakhskoe highway	62°00'36,51"N, 129°37'13,58"E	498,9	6,2

ных по ОМВ исследуемых почвогрунтов (84 %) характеризует их степень техногенного загрязнения как допустимую и умеренную, а меньшая (16 %) – как опасную и чрезвычайно опасную. Таким образом, итоговая оценка экологического состояния почвогрунтов, осуществленная посредством магнитометрической съемки с использованием показателя ОМВ, абсолютно подтверждает правильность произведенной оценки, которая полностью совпадает с результатами исследователей, полученными другими методами с привлечением иных показателей (ПДК, КЗК, Zc, биотестирование фитотоксичности) [1, 3–5, 8, 9].

С учетом всего вышесказанного, а также отмечаемым устойчивым ростом численности населения г. Якутск и, как следствие, возрастанием антропогенной и техногенной нагрузки на городские почвогрунты, является целесообразной организация сети мониторинговых наблюдений (табл. 5).

Данная сеть в настоящее время включает около 50 точек в соответствии с их магнитными характеристиками, полученными впервые в 2020 г. Характеризуя в настоящее время техногенное загрязнение изучаемых почвогрунтов, необходимо отметить его чрезвычайно контрастный или пятнистый характер. Так в изученных почвогрунтах, расположенных вдоль Вилюйского переулка, одновременно отмечаются точки с допустимой (т. 5), умеренной (т. 9) и опасной (т. 12) степенью техногенного загрязнения (см. табл. 5). Такая же тенденция отмечается и для других улиц и районов г. Якутск (см. табл. 1). Последнее обусловлено не только высокой контрастностью распространения техногенных загрязнений в пределах различных районов города, но также и работами по реконструкции и ремонту дорог, а также озеленению городских территорий, в ходе которых происходит существенное изменение состава исследуемых почвогрунтов.

Выводы

1. Впервые проведено определение ОМВ техногенно-загрязненных почвогрунтов г. Якутск, сформированных на многолетнемерзлых породах и функционирующих в условиях криоаридного климата Центральной Якутии. При этом весь массив данных ($n = 444$ измерения) был разбит на семь рангов с шагом $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Основная масса полученных величин (84 %) укладывалась в интервалы значений до $250 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а меньшая часть таковых (16 %) попадала в интервалы значений $>250 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

2. Величины ОМВ почвогрунтов г. Якутск изменяются значительно, при среднем значении $163,5 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, предел изменения составлял $13,2–1220,0 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, т. е. почти на три порядка величин (10^3), что указывает на высокую вариабельность изменения данного показателя $V = 64$ %. Также значительно варьируют и средние величины ОМВ, полученные для почвогрунтов отдельных улиц и районов города, изменяясь от 80,3 до $314,6 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

3. Среднее значение ОМВ почвогрунтов г. Якутск сопоставимо с таковыми, определенными для отдельных промышленных районов г. Москва ($160–180 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), г. Пермь ($183 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), г. Медногорск ($158 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), и в то же время значительно выше величин, полученных для крупных промышленно развитых городов Китая, таких как Ханьчжоу и Лоян ($128 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Также установлено, что суммарный показатель загрязнения данных почвогрунтов ТМ (Zc) связан с показателем ОМВ сильной положительной ($r = 0,937$) статистически значимой ($n = 8$, $r_{st} = 0,707$, $p = 0,95$) корреляционной связью, практически приближающейся к линейной зависимости.

Литература

1. *Торговкин Н.В.* Геохимические особенности техногенных грунтов криолитозоны на примере территории г. Якутска: Автореф. канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2017. 21 с.
2. *Соломонов Н.Г., Ремигаило П.А., Десяткин Р.В., Охлопков И.М., Исаев А.П., Захарова В.И.* Биоэкологические проблемы крупного города на Севере (на примере г. Якутск) // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8, № 4. С. 32–39.
3. *Сивцева Н.Е.* Экогеохимические особенности формирования урбаноземов в условиях криолитозоны (на примере г. Якутска): Автореф. на канд. биол. наук. Якутск, 2012. 23 с.
4. *Саввинов Д.Д., Макарова М.П., Тимофеев А.Г., Ковальский Д.В.* Микроэлементы в почвах пригородной зоны г. Якутска // Наука и образование. 2014. № 2. С. 7–10.
5. *Сивцева Н.Е., Легостаева Я.Б., Макаров В.С., Васильев Н.Ф.* Экологическая оценка состояния территории г. Якутск по суммарному показателю загрязнения почвенного покрова // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8, № 2. С. 30–35.
6. *Макаров В.Н.* Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутии // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 45–48.
7. *Щелчкова М.В., Жерготова М.С.* Ферментативная активность мерзлотной лугово-черноземной по-

чвы транспортной зоны «Аэропорт – Якутск» // Наука и образование. 2014. № 2. С. 14–18.

8. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Геохимическая характеристика техногенных отложений (культурного слоя) в криолитозоне // Наука и образование. 2017. № 3. С. 38–45.

9. Солдатова В.Ю., Шадрин Е.Г., Карпова С.Д. Биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска с использованием теста – объекта овса посевного *Avena Sativa* L. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24, № 2. С. 76–86.

10. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Загрязнение атмосферы города Якутска взвешенными веществами // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 1. С. 43–50.

11. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль: ЯГТУ, 1995. 223 с.

12. Mullins C.E. Magnetic susceptibility of the soils and its significance in soil science – a review // Journal of Soil Science. 1977. Vol. 28. P. 223–246.

13. Гладышева М.А., Иванов А.В., Строганова М.Н. Выявление ареолов техногенно-загрязненных почв Москвы по их магнитной восприимчивости // Почвоведение. 2007. № 2. С. 235–242.

14. Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Лобанова Е.С. Загрязненность тяжелыми металлами и металлоидами почв г. Пермь // Агрохимия. 2009. № 4. С. 60–68.

15. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв (обзор литературы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 1. С. 13–20.

16. Латышенко К.П., Разумовская М.Ю. Экспресс-контроль городских почв на содержание тяжелых металлов // Мир измерений. 2011. № 7. С. 39–41.

17. Васильев А.А., Лобанова Е.С. Картограмма магнитной восприимчивости почвенного покрова г. Перми // Пермский аграрный вестник. 2013. № 3(3). С. 24–27.

18. Решетников М.В., Гребенюк Л.В., Кузнецов В.В. Пространственное распределение магнитной восприимчивости почв в пределах города Медногорска (Оренбургская область) // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 3(178). С. 177–182.

19. Макаров О.А., Кубарев Е.Н., Чистова О.А., Карева О.В., Крикуненко А.С., Балджиев А.С. Магнитная восприимчивость почв на придорожных территориях // Земледелие. 2019. № 2. С. 17–20.

20. Lu S.G., Bou S.Q. Study on the correlation of magnetic properties an heavy metals content in urban soils of Hagzhou city, China // J. Appl. Geophys. 2006. Vol. 60. P. 1–12.

21. Lu S.G., Bou S.Q., Xue G.F. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China // Geophys. J. Intern. 2007. Vol. 171. P. 568–580.

22. Golden N., Potito A.P., Zhang C., Morrison L., Gipson P.J. Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an Urban Bonfire site // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 52. P. 86–96.

23. Макаров О.А., Яковлев А.С., Тоцева Г.П., Иванов А.В. Магнитная восприимчивость почв железнодорожных объектов ЦАО города Москвы // Экологическая безопасность. 2013. № 2. С. 71–73.

24. Чевычелов А.П., Скрыбыкина В.П., Васильева Т.И. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии // Почвоведение. 2009. № 6. С. 648–657.

25. Климат Якутска / Под ред. Ц.А. Швер, С.А. Изюменко. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 247 с.

26. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 399 с.

27. Якутск: географический атлас. М.: Комитет по геодезии и картографии РФ, 1992. 56 с.

28. Якутск: картографический атлас. Якутск: Медиа-холдинг «Якутия», 2012. 232 с.

29. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 328 с.

30. Численность населения городов Китая. URL: <http://comparecites.org/ru/compare/Hangzl> (дата обращения: 01.11.2020).

31. Численность населения 100 крупнейших городов России. URL: http://www.sites.google.com/site/ruregdatav1/largest_cities_russia (дата обращения: 01.11.2020).

32. Способ определения техногенного загрязнения почв и донных осадков металлами: пат. 2110068 Рос. Федерация. № 93030153/28/ Молоствовский Э.А., Еремин В.Н.; заявл. 10.06.93, 2с.

33. Павлов П.Д., Букатин М.Д., Решетников М.В., Еремин В.Н. Состояние почвенного покрова в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов (на примере Балаковского полигона Саратовской области) // Аграрный научный журнал. 2015. № 2. С. 21–25.

Поступила в редакцию 25.01.2021

Принята к публикации 26.02.2021

Об авторах

ЧЕВЫЧЕЛОВ Александр Павлович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, <https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, Researcher ID: D-7565-2018, chev.soil@list.ru;

АЛЕКСЕЕВ Алексей Алексеевич, лаборант, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, <https://orcid.org/0000-0003-0041-7458>, alex3.fromru@gmail.com;

КУЗНЕЦОВА Любовь Ивановна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, <https://orcid.org/0000-0001-8374-4782>, likkol@yandex.ru.

Информация для цитирования

Чевычелов А.П., Алексеев А.А., Кузнецова Л.И. Использование показателя магнитной восприимчивости почв для оценки экологического состояния почвогрунтов г. Якутска // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 1. С. 78–92. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-8>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-8

The use of the magnetic susceptibility index of soils for the assessment of the ecological state of the soils in Yakutsk

A.P. Chevychelov*, A.A. Alekseev, L.I. Kuznetsova

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia,
chev.soil@list.ru

Abstract. For the first time, the volume magnetic susceptibility (VMS) was determined for technogenically polluted soils of Yakutsk formed on permafrost and functioning in the cryoarid climate of Central Yakutia. Magnetometric survey was carried out over the territory of the modern city of Yakutsk using an arbitrary observation network, and 444 measurements of soil VMS were made using a small-sized KM-7 kappameter. The values of soil VMS in Yakutsk vary significantly, with the average value equal to $163,5 \cdot 10^{-5}$ Si units. This parameter varies within the range $13,2-1220,0 \cdot 10^{-5}$ Si units, that is, almost three orders of magnitude (10^3), which points to its high variability while the variation coefficient is $V = 64\%$. The average values of VMS obtained for the soils of individual streets and districts of the city vary significantly, too: from $80,3$ to $314,6 \cdot 10^{-5}$ Si units, which is almost 4 times. A histogram of the VMS of soils in Yakutsk was compiled, when the entire data array was divided into 7 ranks or classes with a step equal to $50 \cdot 10^{-5}$ Si units. As a result, the majority of all values (84 %) fit within the range up to $250 \cdot 10^{-5}$ Si units, while only 16 % of the total number of measurements were above $250 \cdot 10^{-5}$ Si units. According to the results of the study, it was also found that the total indicator of contamination of the studied soils with heavy metals (Zc) is associated with the VMS indicator with a strong positive ($r = 0,937$) statistically significant ($n = 8$, $r_{st} = 0,707$, $p = 0,95$) correlation, almost approaching a linear relationship. The average VMS of the Yakutsk soils is comparable with the values determined for the industrial districts of Moscow ($160-180 \cdot 10^{-5}$ Si units), Perm ($183 \cdot 10^{-5}$ units Si), Mednogorsk ($158 \cdot 10^{-5}$ Si units), but at the same time it is much larger than the values obtained for large industrial cities in China, such as Hangzhou and Luoyang ($128 \cdot 10^{-5}$ Si units).

Key words: cryolithozone, Yakutsk, technogenically polluted soils, magnetic susceptibility.

Acknowledgements. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0027, reg. No. AAAA-A21-121012190033-5).

References

1. Torgovkin N.V. Geohimicheskie osobennosti tekhnogennyh gruntov kriolitozony na primere territorii g. Yakutsk: Avtoref. na soisk. uchenoj step. kand. Yakutsk, 2017. 21 p.
2. Solomonov N.G., Remigajlo P.A., Desyatkin R.V., Ohlopkov I.M., Isaev A.P., Zaharova V.I. Bioekologicheskie problemy krupnogo goroda na Severe (na primere g. Yakutsk) // Vestnik SVFU. 2011. Vol. 8, No. 4. P. 32–39.

3. *Sivceva N.E.* Ekogeohimicheskie osobennosti formirovaniya urbanozemov v usloviyah kriolitozony (na primere g. Yakutska): avtoref. na soisk. uchenoj step. kand. biol. nauk. Yakutsk, 2012. 23 p.
4. *Savvinov D.D., Makarova M.P., Timofeev A.G., Koval'skij D.V.* Mikroelementy v pochvah prigorodnoj zony g. Yakutska // *Nauka i obrazovanie*. 2014. No. 2. P. 7–10.
5. *Sivceva N.E., Legostaeva Ya.B., Makarov V.S., Vasil'ev N.F.* Ekologicheskaya ocenka sostoyaniya territorii g. Yakutska po summarnomu pokazatelyu zagryazneniya pochvennogo pokrova // *Vestnik SVFU*. 2011. Vol. 8, No. 2. P. 30–35.
6. *Makarov V.N.* Ekologo-geohimicheskaya ocenka tekhnogennoogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu Yakutii // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010. No. 1. P. 45–48.
7. *Shchelchkova M.V., Zhergotova M.S.* Fermentativnaya aktivnost' merzlotnoj lugovo-chernozemnoj pochvy transportnoj zony «Aeroport – Yakutsk» // *Nauka i obrazovanie*. 2014. No. 2. P. 14–18.
8. *Makarov V.N., Torgovkin N.V.* Geohimicheskaya charakteristika tekhnogenных otlozhenij (kul'turnogo sloya) v kriolitozone // *Nauka i obrazovanie*. 2017. No. 3. P. 38–45.
9. *Soldatova V.Yu., Shadrina E.G., Karpova S.D.* Biotestirovanie fitotoksichnosti pochvogruntov g. Yakutska s ispol'zovaniem testa – ob'ekta ovsa posevnogo Avena Sativa L. // *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2018. Vol. 24, No. 2. P. 76–86.
10. *Makarov V.N., Torgovkin N.V.* Zagryaznenie atmosfery goroda Yakutska vzheshennymi veshchestvami // *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2020. Vol. 25, No. 1. P. 43–50.
11. *Babanin V.F., Truhin V.I., Karpachevskij L.O., Ivanov A.V., Morozov V.V.* Magnetizm pochv. Yaroslavl': YAGTU, 1995. 223 p.
12. *Mullins C.E.* Magnetic susceptibility of the soils and its significance in soil science – a review // *Journal of Soil Science*. 1977. Vol. 28. P. 223–246.
13. *Gladysheva M.A., Ivanov A.V., Stroganova M.N.* Vyyavlenie areolov tekhnogenno-zagryaznennykh pochv Moskvy po ih magnetnoj vospriimchivosti // *Pochvovedenie*. 2007. No. 2. P. 235–242.
14. *Vodyanickij Yu.N., Vasil'ev A.A., Lobanova E.S.* Zagryaznennost' tyazhelymi metallami i metalloidami pochv g. Perm' // *Agrohimiya*. 2009. No. 4. P. 60–68.
15. *Vodyanickij Yu.N., Shoba S.A.* Magnitnaya vospriimchivost' kak indikator zagryazneniya tyazhelymi metallami gorodskih pochv (obzor literatury) // *Vestn. Mosk. un-ta*. Ser. 17. *Pochvovedenie*. 2015. No. 1. P. 13–20.
16. *Latyshenko K.P., Razumovskaya M.Yu.* Ekspress-kontrol' gorodskih pochv na sodержanie tyazhelykh metallov // *Mir izmerenij*. 2011. No. 7. P. 39–41.
17. *Vasil'ev A.A., Lobanova E.S.* Kartoskhema magnetnoj vospriimchivosti pochvennogo pokrova g. Permi // *Permskij agrarnyj vestnik*. 2013. No. 3(3). P. 24–27.
18. *Reshetnikov M.V., Grebenyuk L.V., Kuznecov V.V.* Prostranstvennoe raspredelenie magnetnoj vospriimchivosti pochv v predelakh goroda Mednogorska (orenburgskaya oblast') // *Vestnik orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. No. 3(178). P. 177–182.
19. *Makarov O.A., Kubarev E.N., Chistova O.A., Kareva O.V., Krikunenko A.S., Baldzhiev A.S.* Magnitnaya vospriimchivost' pochv na pridorozhnykh territoriyah // *Zemledelie*. 2019. No. 2. P. 17–20.
20. *Lu S.G., Bou S.Q.* Study on the correlation of magnetic properties an heavy metals content in urban soils of Hagzhou city, China // *J. Appl. Geophys.* 2006. Vol. 60. P. 1–12.
21. *Lu S.G., Bou S.Q., Xue G.F.* Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China // *Geophys. J. Intern.* 2007. Vol. 171. P. 568–580.
22. *Golden N., Potito A.P., Zhang C., Morrison L., Gipson P.J.* Spatial patterns of metal contamination and magnetic susceptibility of soils at an Urban Bonfire site // *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 52. P. 86–96.
23. *Makarov O.A., Yakovlev A.S., Toshcheva G.P., Ivanov A.V.* Magnitnaya vospriimchivost' pochv zheleznodorozhnykh ob'ektov CAO goroda Moskvy // *Ekologicheskaya bezopasnost'*. 2013. No. 2. P. 71–73.
24. *Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I.* Geografo-geneticheskie osobennosti formirovaniya svojstv i sostava merzlotnykh pochv Central'noj Yakutii // *Pochvovedenie*. 2009. No. 6. P. 648–657.
25. *Klimat Yakutska / Pod red. C.A. Shver, S.A. Izyumenko*. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 247 p.
26. *Vadyunina A.F., Korchagina Z.A.* Metody issledovaniya fizicheskikh svojstv pochv i gruntov. M.: Vysshaya shkola, 1973. 399 p.
27. *Yakutsk: geograficheskij atlas*. M.: Komitet po geodezii i kartografii RF, 1992. 56 p.
28. *Yakutsk: kartograficheskij atlas*. Yakutsk: Mediya-holding «Yakutiya», 2012. 232 p.
29. *Dmitriev E.A.* Matematicheskaya statistika v pochvovedenii. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. 328 p.
30. *Chislennost' naseleniya gorodov Kitaya*. URL: <http://comparecites.org/ru/compare/Hangzl> (data obrashcheniya: 01.11.2020).
31. *Chislennost' 100 krupnejshih gorodov Rossii*. URL: http://www.sites.google.com/site/ruregdatav1/largest_cities_russia (data obrashcheniya: 01.11.2020).
32. *Sposob opredeleniya tekhnogennoogo zagryazneniya pochv i donnykh osadkov metallami: pat. 2110068 Ros. Federaciya*. N 93030153/28/ Molostovskij E.A., Eremin V.N.; zayavl. 10.06.93, 2s.
33. *Pavlov P.D., Bukatin M.D., Reshetnikov M.V., Eremin V.N.* Sostoyanie pochvennogo pokrova v zone vliyaniya poligona tverdykh bytovykh othodov (na primere Balakovskogo poligona Saratovskoj oblasti) // *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2015. No. 2. P. 21–25.

About the authors

CHEVYCHELOV Alexander Pavlovich, Dr. Sci. (Biology), chief researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, ID-7565-2018, chev.soil@list.ru;

ALEKSEEV Alexey Alekseevich, Laboratory Assistant, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-0041-7458>, alex3.fromru@gmail.com;

KUZNETSOVA Lyubov Ivanovna, Research Engineer, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-8374-4782>, likkol@yandex.ru.

Citation

Chevychelov A.P., Alekseev A.A., Kuznetsova L.I. The use of the magnetic susceptibility index of soils for the assessment of the ecological state of the soils in Yakutsk // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 78–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-8>