

Научная статья

УДК 502.521:628.54

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-30-40

Оценка эколого-геохимического состояния сельскохозяйственных угодий, загрязнённых тяжёлыми металлами по интегральным показателям**Татьяна Евгеньевна Афонина**

Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, г. Иркутск, Россия
bf-vniprirodi@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2229-0841>, WOS Research ID ABE-3285-2021,
Scopus Author ID 0000-0002-2229-0841, ID ПИНЦ 129263

В статье рассматривается эколого-геохимическое состояние почв по загрязнённости тяжёлыми металлами в сельскохозяйственных районах Иркутской области. Оценка эколого-геохимического состояния сельскохозяйственных угодий по их загрязнённости техногенными веществами проводят во всём мире, а наиболее опасными признаются тяжёлые металлы 1 и 2-го класса опасности, соответственно, данная статья является актуальной. Эколого-геохимическое состояние оценивали по загрязнённости почв тяжёлыми металлами, применяя интегральный показатель – индекс Zc, который характеризует уровень опасности загрязнения и позволяет получать относительно достоверные представления о накоплении тяжёлых металлов в почвах. Объект исследования – почвы, отобранные на разных сельскохозяйственных угодьях в основных сельскохозяйственных районах Иркутской области. Цель исследования – оценка эколого-геохимического состояния почв, загрязнённых тяжёлыми металлами по интегральному показателю Zc. Задача исследования – определение степени загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжёлыми металлами. Методологический подход составили научные исследования в области «техногенез – биосфера» В. И. Вернадского А. И. Перельмана, В. В. Добровольского, а в области влияния тяжёлых металлов на эколого-геохимическое состояние ландшафтов – труды М. А. Глазовской, В. А. Ковда, Ю. Н. Водяницкого. Материал исследования – образцы почв, отобранные из разных сельскохозяйственных угодий, таких как пашня, пастбище, луг. Почвы исследовали на содержание тяжёлых металлов по методикам М 02-902-125-2005 и М-МВИ-80-2008, РД 52.18.289-90. Эколого-геохимическое состояние почв оценивали по содержанию тяжёлых металлов в подвижной и валовой формах. Результаты исследования показали, что причинами загрязнения сельскохозяйственных угодий в районах являются промышленные выбросы предприятий. На основе полученных результатов определяли интегральный показатель Zc, который позволил оценить современный уровень загрязнения почв на различных сельскохозяйственных угодьях в основных сельскохозяйственных районах Иркутской области. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в сельскохозяйственных угодьях, находящихся под влиянием промышленных выбросов от предприятий, уровень загрязнения почв – от высоко опасного до умеренно опасного. Основным источником поступления в почву токсических веществ от промышленных предприятий является осаждение газопылевых выбросов.

Ключевые слова: интегральный показатель, уровни загрязнения, тяжёлые металлы, почва, источники загрязнения, оценка, эколого-геохимическое состояние, угодья, нагрузка, анализ

Для цитирования

Афонина Т. Е. Оценка эколого-геохимического состояния сельскохозяйственных угодий, загрязнённых тяжёлыми металлами по интегральным показателям // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 2. С. 30–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-30-40

Original article**Assessment of the Ecological and Geochemical State of Soils Contaminated with Heavy Metals Using Integral Indicators****Tatiana E. Afonina**

Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Ezhevsky, Irkutsk, Russia
bf-vniprirodi@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2229-0841>, WOS Research ID ABE-3285-2021,
Scopus Author ID 0000-0002-2229-0841, ID RSCI 129263

The article considers the ecological and geochemical state of soils in agricultural areas of the Irkutsk region. The ecological and geochemical state was assessed based on soil contamination with heavy metals using the integral index Zc, which characterizes the level of contamination hazard and allows obtaining relatively reliable ideas about the accumulation of heavy metals in soils. From this point of view, the relevance of this article is beyond doubt. The object of the study was soils selected from different agricultural lands in the main

© Афонина Т. Е., 2025

agricultural areas of the Irkutsk region. The aim of the study was to assess the ecological and geochemical state of soils contaminated with heavy metals using the integral index Z_c . The main objectives were to determine the degree of contamination of agricultural lands with heavy metals. The methodological approach was based on scientific research in the field of "technogenesis-biosphere" by V. I. Vernadsky, A. I. Perelman, V. V. Dobrovolsky, in the field of the influence of heavy metals on the ecological and geochemical state of landscapes by M. A. Glazovskaya, V. A. Kovda, Yu. N. Vodyanitsky. The study material included soil samples taken from different agricultural lands: arable land, pasture, meadow. The soils were tested for heavy metal content using methods M 02-902-125-2005 and M-MVI-80-2008, RD 52.18.289-90. The ecological and geochemical state of soils was assessed based on the content of heavy metals in mobile and gross forms. The study results showed that the causes of agricultural land pollution in the areas are industrial emissions from enterprises. Based on the results obtained, the integral indicator Z_c was determined, which made it possible to assess the current level of soil pollution on various agricultural lands in the main agricultural areas of the Irkutsk region. The results obtained allowed to conclude that the level of soil pollution in agricultural lands affected by industrial emissions from enterprises ranges from highly hazardous to moderately hazardous. The main source of toxic substances entering the soil from industrial enterprises is the deposition of gas and dust emissions.

Keywords: integral indicator, pollution levels, heavy metals, soil, pollution sources, assessment, ecological and geochemical state, lands, load, analysis

For citation

Afonina T. E. Assessment of the Ecological and Geochemical State of Soils Contaminated with Heavy Metals by Integral Indicators // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 2. P. 30–40. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-2-30-40

Введение. Самым ценным компонентом в биосфере является почва, представляющая собой не только основной компонент биосферы, но и основу всей жизнедеятельности на Земле, состояние которой напрямую влияет на обеспечение жизни всех природных сред, включая человека. Соответственно, очень важным аспектом является оценка качественного состояния почв, т. к. в настоящее время наблюдается общемировая тенденция техногенного загрязнения почв, а доминантными загрязнителями являются тяжёлые металлы. Наибольшую опасность среди них представляют тяжёлые металлы 1 и 2-го класса опасности. Тяжёлые металлы поступают в почву от различных источников загрязнения путём осаждения промышленных выбросов.

Довольно показательным является индекс Z_c , который характеризует уровень опасности загрязнения, позволяющий получать относительно достоверные представления о накоплении химических веществ в почвах [1]. Z_c также известен как суммарный показатель загрязнения почв микроэлементами. Следует отметить, что он рекомендован санитарно-эпидемиологическими службами.

Актуальность исследования. В настоящее время вопрос о загрязнении сельскохозяйственных земель требует глубокого изучения. Тяжёлые металлы являются наиболее опасными загрязнителями, многие из которых относятся к 1 и 2-му классу опасности. Как правило, такие тяжёлые металлы имеют свойства накапливаться в растениях, трудно поддаются трансформации в почве, имея большой период полураспада. Наиболее сильное техногенное загрязнение

тяжёлыми металлами испытывают сельскохозяйственные угодья вблизи крупных промышленных предприятий, больших городов и транспортных путей. Необходимость оценки эколого-геохимической ситуации сельскохозяйственных угодий в регионе с точки зрения актуальности не вызывает сомнения.

Объект исследования – почвы, отобранные на сельскохозяйственных угодьях в основных сельскохозяйственных районах Иркутской области.

Предмет исследования – эколого-геохимическое состояние сельскохозяйственных угодий, подверженных загрязнению от промышленных предприятий.

Цель исследования – оценить эколого-геохимическое состояние почв, загрязнённых тяжёлыми металлами по интегральному показателю – индексу Z_c .

Задача исследования – определить степень загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжёлыми металлами по интегральному показателю – индексу Z_c .

Методология и методы исследования. Методологический подход составили научные исследования в области «техногенез – биосфера» В. И. Вернадского [2; 3] А. И. Перельмана [4; 5], В. В. Добровольского [6], а в области влияния тяжёлых металлов на эколого-геохимическое состояние ландшафтов – труды М. А. Глазовской [7; 8], В. А. Ковда [9], Ю. Н. Водяницкого [10–12].

Материал исследования – образцы почв, отобранные в пяти сельскохозяйственных районах Иркутской области на землях сельскохозяйственного назначения из разных сельскохозяйственных угодий, таких как

пашня, залежь, пастбище, луг. Почвенные образцы отобраны на 52 станциях. Всего проанализировано 160 проб. Для обсуждения результатов взяты средние значения по идентичным угодьям (например, пашни) и с одинаковыми фациальными условиями. Отбор проб проводили по всему почвенному профилю, за исключением пашни, а с каждого почвенного горизонта отбирали пробы почвы, каждая проба маркировалась. Отбор проб проводили на различном удалении от источников загрязнения. Почвенные образцы отбирали согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почвы». Подготовку проб к анализу проводили по методике, предложенной в статье С. С. Дубыниной, Е. В. Напрасниковой [13].

Координаты станций отбора проб определяли с помощью спутникового навигационного GPS-приёмника GARMIN-e-Trex.

Почвы исследовали на содержание тяжёлых металлов по стандартным методикам М 02-902-125-2005, М-МВИ-80-2008, РД 52.18.289-90. Содержание тяжёлых металлов в почвах определяли в подвижной и валовой формах. По полученным результатам анализов выполнены расчёты коэффициента концентрации (K_c), который является показателем уровня загрязнения почв [6; 9]. Данный коэффициент рассчитывают как отношение содержания элемента в исследуемом объекте C_i к среднему фоновому содержанию C_f или предельно допустимых концентраций (далее – ПДК) Спдк в почвах. Для определения коэффициента концентрации K_c взяты фоновые концентрации тяжёлых металлов в почвах. Определение большого количества аналитических показателей тяжёлых металлов в почвах одним и тем же методом позволило выделить фоновые значения. Коэффициент концентрации K_c рассчитывали по формуле (1):

$$K_c = C_i / C_f, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент концентрации элементов;

C_i – концентрация загрязняющего элемента;

C_f – концентрация загрязняющего элемента в фоновой точке [11].

Оценка территории по уровню опасности загрязнения проводится по показателю Ю. Е. Саета Z_c и рассчитывается по формуле (2) [14]:

$$Z_c = \sum K_c x - (n - 1), \quad (2)$$

где Z_c – уровень опасности загрязнения;

$\sum K_c x$ – сумма коэффициентов концентрации элементов;

n – число определяемых элементов.

Результаты исследования. Согласно почвенно-географическому районированию Иркутской области, практически все продуктивные сельскохозяйственные земли относятся к Центральной лесостепной и степной почвенно-биоклиматической области, к зонам Иркутско-Черемховской лесостепной серых лесных, чернозёмов выщелоченных и дерново-подзолистых почв [15].

Изучением тяжёлых металлов в почвах занимались многие исследователи, которые детально изучили источники поступления тяжёлых металлов в почвах и проанализировали практически все тяжёлые металлы [16–20].

Наши многолетние исследования показали, что наиболее загрязнены сельскохозяйственные почвы около промышленных предприятий и транспортных магистралей. Как уже отмечено ранее, основными источниками поступления в почву загрязняющих веществ являются осаждение газопылевых выбросов, миграция тяжёлых металлов от источника загрязнения и их миграция по уклону местности [21]. В Иркутской области исторически сложилось так, что основные сельскохозяйственные земли находятся рядом с промышленными предприятиями, поэтому проведённая эколого-геохимическая оценка почв по индексу Z_c позволила получить достоверные сведения о загрязнённости почв тяжёлыми металлами.

Выбросы загрязняющих веществ от различных промышленных источников поступают, как правило, в атмосферу, однако в конечном итоге они оказываются на поверхности почвы. В дальнейшем происходит либо их деструкция (разложение), либо накопление в поверхностном слое почвы с последующей миграцией в нижележащие почвенные горизонты и накоплением этих веществ в растениях [22].

Для эколого-геохимической оценки состояния почв по уровню опасности загрязнения определяли тяжёлые металлы, относящиеся к 1 и 2-му классам опасности [10; 12]. К 1-му классу опасности (к высоко опасным) относили Hg, Pb, As, Cd, Zn, Cr, Ni, Cr, Se, ко 2-му классу опасности (к опасным) – Co, Cu, Mo, B, Sb [9].

Для эколого-геохимической оценки загрязнённости почв по интегральному показателю Z_c изучали подвижное и валовое содержание тяжёлых металлов в почве 1 и 2-го класса опасности. Результаты состояния почв по подвижной форме тяжёлых металлов приведены в табл. 1. Подвижные формы

тяжёлых металлов обладают повышенной миграционной способностью и определяются такими характеристиками почвы, как тип, кислотность, содержание органического вещества, буферность [23]. Загрязнение почв подвижными формами тяжёлых металлов считается наиболее опасным, т. к. именно в такой форме элементы могут ассимилироваться растениями и поступать в пищевые цепи [24].

Как следует из табл. 1, допустимые уровни загрязнения по показателю ЗС – от очень низкого до умеренно опасного. Очень низкий уровень характерен для почв Аларского (луг, серые лесные почвы) и Шелеховско-

го (пашня) районов. Следует отметить, что умеренно опасный уровень отмечен также в Аларском районе в почвенном горизонте В (горизонт вымывания, механический состав – тяжёлый суглинок), интегральный показатель ЗС – 16,8, а также в Усольском районе на двух станциях отбора проб (пашня), где интегральные показатели составляют 17,6 и 19,9. Следует отметить, что вдоль пашни проходит федеральная трасса М 53. В остальных исследуемых районах на почвах сельскохозяйственных угодий интегральный показатель ЗС по тяжёлым металлам 1 и 2-го класса опасности подвижной формы имеет допустимый уровень.

Таблица 1 / Table 1

Интегральный показатель загрязнения почв по тяжёлым металлам 1 и 2-го класса опасности (подвижное содержание тяжёлых металлов) / Integral indicator of soil pollution by heavy metals of classes 1 and 2 dangers (mobile metal heavy content)

№ п/п / №	Районы отбора пробы, координаты отбора / Sampling areas, sampling coordinates	Вид угодий / Type of land	Почвенный горизонт / Soil horizon	Интегральный показатель Зс / Integral exponent Zc	Уровни загрязнения / Pollution levels
1	Аларский район / Alarsky district N 53° 17' 34,99" E 102° 38' 55,81"	Луг / Meadow	A0A1	5,1	Очень низкий / Very low
			A2B	3,92	Очень низкий / Very low
			B	16,8	Умеренно опасный / Moderately dangerous
2	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 10' 16,9" E 102° 57' 55,5"	Залежь / Deposit	A0A1	16,4	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	10,41	Допустимый / acceptable
			A2B	10,0	Допустимый / acceptable
3	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 10' 19,2" E 102° 58' 15,9"	Пашня / Arable land	An	5,9	Допустимый / acceptable
4	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 04' 55,6" E 103° 11' 01,5"	Пастбище / Pasture	A0A1	6,10	Допустимый / acceptable
			A1A2	10,4	Допустимый / acceptable
			A2B	10,45	Допустимый / acceptable
5	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 04' 58,2" E 103° 11' 28,4	Пастбище / Pasture	A0A1	10,8	Допустимый / acceptable
			A1A2	7,11	Допустимый / acceptable
			A2B	6,8	Допустимый / acceptable
6	Усольский район / Usolsky district N 52° 43' 21,3" E 103° 40' 25,9"	Пашня / Arable land	An	19,93	Умеренно опасный / Moderately dangerous
7	Усольский район / Usolsky district N 52° 43' 49,9" E 103° 40' 48,1"	Пашня / Arable land	An	17,6	Умеренно опасный / Moderately dangerous
8	Усольский район / Usolsky district N 52° 44' 12,12" E 103° 39' 57,41"	Залежь / Deposit	A0A1	10,24	Допустимый / acceptable
			A1A2	12,59	Допустимый / acceptable
			A2B	9,89	Допустимый / acceptable
9	Усольский район / Usolsky district N 52° 44' 54,21" E 103° 39' 81,63'	Лесопарковая зона / Forest park area	A0A1	7,44	Допустимый / acceptable
			A1A2	6,84	Допустимый / acceptable

Окончание таблицы 1 / The end of the table 1

№ п/п / №	Районы отбора пробы, координаты отбора / Sampling areas, sampling coordinates	Вид угодий / Type of land	Почвенный горизонт / Soil horizon	Интегральный показатель Zc / Integral exponent Zc	Уровни загрязнения / Pollution levels
10	Зиминский район / Ziminsky district N 53°56'29,33" E 102°01'16,08"	Пастбище / Pasture	A0A1	7,62	Допустимый / cceptable
			A1A2	9,18	Допустимый / cceptable
			A2B	11,8	Допустимый / cceptable
11	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 56' 34,48" E 102° 01' 21,86	Пастбище / Pasture	A0A1	5,72	Допустимый / cceptable
			A1A2	6,35	Допустимый / cceptable
			A2B	8,30	Допустимый / cceptable
12	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 53' 51,49" E 102° 02' 20,57	Луг / Meadow	A0A1	6,0	Допустимый / cceptable
			A2B	6,45	Допустимый / cceptable
			B	7,34	Допустимый / cceptable
13	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 53' 58,61" E 102° 02' 27,67	Пастбище / Pasture	A0A1	4,38	Допустимый / cceptable
			A1A2	5,99	Допустимый / cceptable
			A2B	6,71	Допустимый / cceptable
14	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°11'52" E 104°06'13"	Пастбище / Pasture	A0A1	6,0	Допустимый / cceptable
			A1A2	11,1	Допустимый / cceptable
			A2B	10,47	Допустимый / cceptable
15	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°13'31" E 104°02'21"	Пашня / Arable land	An	3,4	Очень низкий / Very low
16	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°15'42" E 104°01'17"	Пашня / Arable land	An	5,7	Очень низкий
17	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°16'51" E 104°01'71"	Пашня / Arable land	An	7,7	Очень низкий

Валовое содержание тяжёлых металлов в почвах связано с органическими веществами и другими элементами в почве, однако они обладают свойством не накапливаться в растениях, в отличие от подвижной формы тяжёлых металлов. Ведущим фактором, который способствует накоплению тяжёлых металлов в почвах, является высокое содержание органического вещества, глинистых или тяжёлых суглинистых фракций в почвах. Высокое валовое содержание тяжёлых металлов в почвах характеризует их загрязнённость [23; 24].

Как правило, высокое валовое содержание тяжёлых металлов наблюдается в почвах, около промышленных предприятий г. Шелехов, Ангарск, Усолье-Сибирское. Наши исследования, проведённые в близких фациальных структурах, показали высокое содержание ртути (Hg), превышающее ПДК в 2,5 раза, а фоновое значение – в 4,5 раза [25].

Интегральный показатель загрязнения почв тяжёлыми металлами 1 и 2-го клас-

са по валовому содержанию тяжёлых металлов в почвах показал, что почвы имеют допустимый уровень загрязнения по всему почвенному профилю с интегральными показателями 13,60–14,29 в единичном случае в Усольском районе, а сельскохозяйственные угодья – залежь, представленная дерново-подзолистыми почвами. В Зиминском районе на всех сельскохозяйственных угодьях также преобладает допустимый уровень загрязнения, а интегральный показатель составляет 10,10–15,80 (табл. 2). В других исследуемых районах (в Аларском, Черемховском, Усольском, Шелеховском) в исследуемых угодьях преобладает умеренно-опасный уровень загрязнения почв с интегральными показателями 16,10–27,34. Высоко опасный уровень загрязнения почв с интегральными показателями 40,86–62,37 отмечен в Шелеховском районе (луг, торфяно-глеевые почвы) около промышленного предприятия.

Таблица 2 / Table 2

Интегральный показатель загрязнения почв по тяжёлым металлам 1 и 2-го класса опасности (валовое содержание тяжёлых металлов) / Integral indicator of soil pollution by heavy metals of hazard classes 1 and 2 (total metal heavy content)

№ п/п / №	Районы отбора пробы, координаты отбора / Sampling areas, sampling coordinates	Вид угодий / Type of land	Почвенный горизонт / Soil horizon	Интеграль- ный пока- затель Zc / Integral exponent Zc	Уровни загрязнения / Pollution levels
1	Аларский район / Alarsky district N 53°17'34,99" E 102°38'55,81"	Луг / Meadow	A0A1	20,9	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A2B	19,81	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			B	22,8	Умеренно опасный / Moderately dangerous
2	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 10' 16,9" E 102° 57' 55,5"	Залежь / Deposit	A0A1	24,3	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	22,6	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A2B	21,17	Умеренно опасная / Moderately dangerous
3	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 10' 19,2" E 102° 58' 15,9"	Пашня / Arable land	An	19,79	Умеренно опасный / Moderately dangerous
4	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 04' 55,6" E 103° 11' 01,5"	Пастбище / Pasture	A0A1	21,40	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	25,15	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A2B	27,34	Умеренно опасный / Moderately dangerous
5	Черемховский район / Cheryomkhovsky district N 53° 04' 58,2" E 103° 11' 28,4	Пастбище / Pasture	A0A1	20,45	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	23,24	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A2B	26,75	Умеренно опасный / Moderately dangerous
6	Усольский район / Usolsky district N 52° 43' 21,3" E 103° 40' 25,9"	Пашня / Arable land	An	16,01	Умеренно опасный / Moderately dangerous
7	Усольский район / Usolsky district N 52° 43' 49,9" E 103° 40' 48,1"	Пашня / Arable land	An	22,41	Умеренно опасный / Moderately dangerous
8	Усольский район / Usolsky district ОАО «Усольмаш» N 52° 44' 12,12" E 103° 39' 57,41"	Залежь / Deposit	A0A1	14,29	Допустимый / Acceptable
			A1A2	13,56	Допустимый / Acceptable
			A2B	14,19	Допустимый / Acceptable
9	Усольский район / Usolsky district N 52° 44' 54,21" E 103° 39' 81,63'	Лесопарковая зона / Forest park area	A0A1	22,41	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	25,7	Умеренно опасный / Moderately dangerous
10	Зиминский район / Ziminsky district N 53°56'29,33" E 102°01'16,08"	Пастбище / Pasture	A0A1	17,1	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	17,7	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A2B	18,0	Умеренно опасный / Moderately dangerous

Окончание табл. 2 / The end of the table 2

№ п/п	Районы отбора пробы, координаты отбора / Sampling areas, sampling coordinates	Вид угодий / Type of land	Почвенный горизонт / Soil horizon	Интегральный показатель Zc / Integral exponent Zc	Уровни загрязнения / Pollution levels
11	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 56' 34,48" E 102° 01' 21,86	Пастбище / Pasture	A0A1	16,5	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	15,8	Допустимый / Acceptable
			A2B	13,5	Допустимый / Acceptable
12	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 53' 51,49" E 102° 02' 20,57	Луг / Meadow	A0A1	11,61	Допустимый / Acceptable
			A2B	10,15	Допустимый / Acceptable
			B	10,10	Допустимый / Acceptable
13	Зиминский район / Ziminsky district N 53° 53' 58,61" E 102° 02' 27,67	Пастбище / Pasture	A0A1	16,90	Умеренно опасный / Moderately dangerous
			A1A2	15,86	Допустимый / Acceptable
			A2B	14,30	Допустимый / Acceptable
14	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°11'52" E 104°06'13"	Пастбище / Pasture	A0A1	13,9	Допустимый / Acceptable
			A1A2	15,48	Допустимый / Acceptable
			A2B	19,44	Умеренно опасный / Moderately dangerous
15	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°13'31" E 104°02'21"	Пашня / Arable land	An	22,32	Умеренно опасный / Moderately dangerous
16	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°21'72" E 104°09'43"	Луг / Meadow	A0A1	58,05	Высоко опасный / Highly dangerous
			A2B	62,37	Высоко опасный / Highly dangerous
			B	40,86	Высоко опасный / Highly dangerous
17	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°15'42" E 104°01'17"	Пашня / Arable land	An	23,19	Умеренно опасный / Moderately dangerous
18	Шелеховский район / Shelekhovsky district N 52°16'51" E 104°01'71"	Пашня / Arable land	An	25,5	Умеренно опасный / Moderately dangerous

Выводы. Проведённые исследования по оценке эколого-геохимического состояния сельскохозяйственных угодий в наиболее плодородных сельскохозяйственных районах Иркутской области по индексу Zc позволили получить достоверные сведения о загрязнённости почв тяжёлыми металлами по районам исследования (рисунок).

Отмечена чётко выраженная зависимость содержания тяжёлых металлов по уровню индекса Zc в почве от источников загрязнения, что свидетельствует непосредственно о прямом влиянии промышленных выбросов от предприятий на загрязнение почв. Сельскохозяйственные угодья, находящиеся рядом с промышленными предприятиями, имеют высоко опасный уровень загрязнения по интегральному показателю. Так, высоко опасный уровень загрязнения характерен для сельскохозяйственных угодий в Шелеховском районе (луг на торфяно-глеевых почвах).

В большинстве проанализированных почвенных образцов из различных районов и сельскохозяйственных угодий на загрязнение почв тяжёлыми металлами 1 и 2-го класса по валовому содержанию выявлено, что преобладает умеренно опасный уровень загрязнения почв. На загрязнение сельскохозяйственных угодий влияет воздушный перенос промышленных выбросов. Примером в данном случае служит Аларский район, где отсутствуют прямые источники выбросов и промышленные производства, а уровень загрязнения является умеренно опасным, что указывает на перенос тяжёлых металлов от Братского промышленного узла (450 км) благодаря северо-западному переносу и розе ветров.

Благополучным районом является Зиминский, где на всех сельскохозяйственных угодьях преобладает допустимый уровень загрязнения.



Фрагменты картосхемы уровней загрязнения почв тяжёлыми металлами /
Fragments of the cartography of soil pollution levels by heavy metals

Условные обозначения / Symbols: Наименование районов / Naming of districts: 1 – Зиминский район / Ziminsky district;
2 – Аларский район / Alarsky district; 3 – Черемховский район / Cheremkhovsky district; 4 – Усольский район / Usolsky district;
5, 6 – Шелеховский район / Shelekhovsky district

Подвижные формы тяжёлых металлов имеют допустимые уровни загрязнения по показателю Z_c – от очень низкого до умеренно опасного. Очень низкий уровень характерен для почв Аларского (луг, серые лесные поч-

вы) и Шелеховского (пашня) районов – 3,4 и 7,7 соответственно (см. табл. 1). В остальных исследуемых районах на почвах сельскохозяйственных угодий интегральный показатель Z_c по тяжёлым металлам 1 и 2-го класса

опасности подвижной формы имеет допустимый уровень.

Оценка современного эколого-геохимического состояния сельскохозяйственных угодий, загрязнённых тяжёлыми металлами по интегральным показателям, показала, что в районах с высоко опасным и умеренно опасным уровнями загрязнения необходим

постоянный мониторинг за содержанием не только тяжёлых металлов, но и других загрязняющих веществ в почвах сельскохозяйственных угодий. Высокое содержание тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ в почвах может являться источником их накопления в сельскохозяйственной продукции.

Список литературы

1. Богданов Н. А. Диагностика территорий по интегральным показателям химического загрязнения почв и грунтов // Гигиена и санитария. 2014. № 1. С. 92–97. EDN: RYDZIH
2. Вернадский В. И. Биосфера. М.: Наука, 1967. 309 с.
3. Вернадский В. И. Проблемы биогеохимии. М.: Наука, 1980. 320 с.
4. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Наука, 1972. 288 с.
5. Перельман А. И. Геохимия ландшафтов. М.: Высшая школа, 1975. 341 с.
6. Добровольский В. В. Проблемы геохимии в физической географии. М.: Просвещение, 1984. 140 с.
7. Глазовская М. А. Теория геохимии ландшафтов в приложении к изучению техногенных потоков рассеяния и анализу способности природных систем к самоочищению // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 7–41.
8. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. 326 с.
9. Ковда В. А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с. EDN: VXFJNS
10. Водяницкий Ю. Н. Тяжёлые металлы и металлоиды в почвах. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. 86 с.
11. Водяницкий Ю. Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжёлыми металлами и ме-таллоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280. EDN: MVSHFL
12. Водяницкий Ю. Н. Превращение мышьяка в загрязнённых почвах // Почвоведение. 2013. № 4. С. 87–96.
13. Дубынина С. С., Напрасникова Е. В. Эколого-геохимическая оценка антропогенных ландшафтов зоны КАТЭКА // Геохимия биосферы (к 90-летию А. И. Перельмана). М.: Смоленск, 2006. С. 125–127.
14. Саёт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 319 с. ISBN: 5-247-01127-9/ EDN: XDXBQN
15. Колесниченко В. Т. Почвенно-географическое районирование. Земельные фонды сельского хозяйства и их использование // Журнал физиологии стресса и биохимии. 2017. Т. 13, № 4. С. 53–64.
16. Белозерцева И. А., Воробьева И. Б., Сороковой А. А., Лопатин Д. Н. Загрязнение почв урбанизированных территорий Байкальского региона // Почвоведение. 2022. № 1. С. 119–132. DOI: 10.31857/S0032180X22010038. EDN: DJQQSR
17. Выборов С. Г., Павелко А. И., Щукин В. Н., Янковская Э. В. Оценка степени опасности загрязнения почв по комплексному показателю нарушенного геохимического поля // Современные проблемы загрязнения почв: материалы междунар. науч. конф. М., 2004. С. 195–197.
18. Kabala C., Chodak T., Szerszen L., Karczewska A., Szopka K., Fraczak U. Factors influencing the concentration of heavy metals in soils of allotment gardens in the city of wroclaw, Poland // Fresenius Environmental Bulletin. 2009. Vol. 18, no. 7. P. 1118–1124.
19. Yang Q, Li Z, Lu X, Duan Q, Huang L, Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment // Sci Total Environ. 2018. VOL. 642, P. 690–700. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068
20. Belozertseva I. A., Lopatina D. N., Sorokovoi A. A. Soils of the baikal region: mapping, use, transformation // Agriculture and Food Sciences Research. 2024. Vol. 11, no. 2. P. 96–103. DOI: 10.20448/aesr.v11i2.6177. EDN: KDWZJ
21. Афонина Т. Е. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Прибайкалья и бассейна оз. Байкал // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «География. Гео-экология». 2024. № 2. С. 114–119. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119. EDN: LGDGYA
22. Афонина Т. Е. Мониторинг загрязнения снежного покрова углеводородными соединениями // Вестник ИргСХА. 2023. Вып. 4. С. 8–19.
23. Байкенова Ю. Г. Оценка степени опасности загрязнения почв тяжёлыми металлами // Аграрный вестник Урала. 2014. № 7. С. 10–14. EDN: SWEGDB
24. Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 288 с.
25. Афонина Т. Е. Анализ качественного состояния сельскохозяйственных земель в Иркутской области // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Молодежный, 2022. С. 3–10. EDN: QGZXTU

References

1. Bogdanov NA. Diagnosis of the Territories With the Use of Integral Indices of Chemical Contamination of Soil and Grounds, Relied on the Background and Hygienic Standards. *Hygiene And Sanitation*. 2014;(1):92–97. EDN: RYDZIH (In Russian).
2. Vernadskii VI. Biosfera. Moscow: Nauka; 1967. 309 p. (In Russian).
3. Vernadskii VI. Problemy biogeokhimii. Moscow: Nauka; 1980. 320 p. (In Russian).
4. Perel'man AI. Geokhimiya elementov v zone gipergenezisa. Moscow: Nauka; 1972. 288 p. (In Russian).
5. Perel'man AI. Geokhimiya landshaftov. Moscow: Vysshaya shkola; 1975. 341 p. (In Russian).
6. Dobrovolskii VV. Problemy geokhimii v fizicheskoi geografii. Moscow: Prosveshchenie; 1984. 140 p. (In Russian).
7. Glazovskaya MA. Teoriya geokhimii landshaftov v prilozhenii k izucheniyu tekhnogennykh potokov rasseyaniya i analizu sposobnosti prirodnikh sistem k samoochishcheniyu. In: Tekhnogennyye potoki veshchestva v landshaftakh i sostoyanie ekosistem. Moscow: Nauka; 1981. P. 7–41. (In Russian).
8. Glazovskaya MA. Geokhimiya prirodnikh i tekhnogennykh landshaftov SSSR. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 326 p. EDN: VXFJNS (In Russian).
9. Kovda VA. Biogeokhimiya pochvennogo pokrova. Moscow: Nauka; 1985. 263 p. (In Russian).
10. Vodyanitskii YuN. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh. Moscow: GNU Pochvennyi institut im. VV Dokuchaeva RASKhN; 2008. 86 p. (In Russian).
11. Vodyanitskii YuN. Equations for Assessing the Total Contamination of Soils with Heavy Metals and Metalloids. *Pochvovedenie*. 2010;(10):1276–1280. EDN: MVSHFL (In Russian).
12. Vodyanitskii YuN. Biogeochemical Role of Magnetite in Urban Soils (Review of Publications). *Pochvovedenie*. 2013;(4):87–96. DOI: 10.7868/S0032180X13030131. EDN: PUXUPV (In Russian).
13. Dubynina SS, Naprasnikova EV. Ekologo-geokhimicheskaya otsenka antropogennykh landshaftov zony KATEKa. In: Geokhimiya biosfery (k 90-letiyu A. I. Perel'mana). Moscow-Smolensk; 2006. P. 125–127. (In Russian).
14. Saet YuE, Revich BA, Yanin EP, Smirnova RS, Basharkevich IL, Onishchenko TL, Pavlova LN, Trefilova NYa, Achkasova AI, Sarkisyan SSh. Geokhimiya okruzhayushchei sredy. Moscow: Nedra; 1990. 319 p. ISBN: 5-247-01127-9 EDN: XDXBQN (In Russian).
15. Kolesnichenko VT. Soils of the Irkutsk Region, Agriculture Land Funds and Quality of Soils Chapter 4. Nature of the Region. *Journal Of Stress Physiology & Biochemistry*. 2017;13(4):53–64. (In Russian).
16. Belozertseva IA, Vorob'eva IB, Sorokovoia AA, Lopatin DN. Soil Pollution in Urbanized Centers of Baikal Region. *Eurasian Soil Science*. 2022;(1): 119–132. DOI: 10.31857/S0032180X22010038. EDN: DJQQSR (In Russian).
17. Otsenka stepeni opasnosti zagryazneniya pochv po kompleksnomu pokazatelyu narushennogo geokhimicheskogo polya. In: Sovremennyye problemy zagryazneniya pochv: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Moscow; 2004. P. 195–197.
18. Kabala C, Chodak T, Szerszen L, Karczewska A, Szopka K, Fraczak U. Factors influencing the concentration of heavy metals in soils of allotment gardens in the city of wroclaw, Poland. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2009;18(7):1118–1124.
19. Qianqi Yang, Zhiyuan Li, Xiaoning Lu, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk. *Sci Total Environ*. 2018; 15(642):690–700. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068.
20. Belozertseva IA, Lopatina DN, Sorokovoi AA. Soils of the baikal region: mapping, use, transformation. *Agriculture and Food Sciences Research*. 2024;11(2):96–103. DOI: 10.20448/aesr.v11i2.6177. EDN: KDWZWJ (In Russian).
21. Afonina TE. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover of the Baikal Region and the Baikal Lake Basin. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2024;(2):114–119. (In Russian).
22. Afonina TE. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova uglevodorodnymi soedineniyami. *Vestnik IrGSKhA*. 2023;4(117):8–19. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119. EDN: LGDGYA (In Russian)
23. Baikenova YuG. Estimation of the Degree of Danger of Soil Pollution With Heavy Metals. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2014;(7):10–14. EDN: SWEGDB (In Russian).
24. Kovalevskii AL. Biogeokhimiya rastenii. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie; 1991. 288 p. (In Russian).
25. Afonina TE. Analysis of the Qualitative State of Agricultural Land in the Irkutsk Region. In: Klimat, Ehkologiya, Sel'skoe Khozyaistvo Evrazii: Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. Molodezhnyi; 2022. P. 3–10. EDN: QGZXU (In Russian).

Информация об авторе

Афони́на Татьяна Евге́ньевна, д-р геогр. наук, профессор кафедры землеустройства, кадастров и сельскохозяйственной мелиорации, Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, г. Иркутск, Россия; bf-vnprirodi@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2229-0841>, WOS Research ID ABE-3285-2021, Scopus Author ID 0000-0002-2229-0841, ID ПИНЦ 129263. Область научных интересов:

геоэкологические проблемы наземных и аквальных геосистем, рациональное природопользование, мониторинг и охрана окружающей среды.

Information about the author

Afonina Tatyana E., Doctor of Geography, Professor, Land Management, Cadastre and Agricultural Land Reclamation department, Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Yezhevsky, Irkutsk, Russia; bf-vnipriodi@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2229-0841>, WOS Research ID ABE-3285-2021, Scopus Author ID 0000-0002-2229-0841, ID РИНЦ 129263. Research interests: geoecological problems of terrestrial and aquatic geosystems, rational use of natural resources, monitoring and environmental protection.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 28.04.2025.

Received 2025, March 26; approved after review 2025, April 24; accepted for publication 2025, April 28.