



Научная статья

УДК 550.34.016

EDN: FEQMET

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-4-486-497



## Об альтернативном экономичном подходе к определению высоких концентраций подвижных форм тяжелых металлов (на примере исследований экологического вреда отходов горно-металлургических предприятий)

А.А. Сумкин<sup>а</sup>, А.С. Алексеев<sup>б</sup>, В.В. Трусова<sup>с✉</sup>, О.Л. Качор<sup>д</sup>, А.В. Паршин<sup>е</sup>

<sup>а,с-е</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

<sup>б,е</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>б</sup>Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

**Резюме.** В статье рассматривается новая простая и недорогая методика определения высоких концентраций водорастворимых форм тяжелых металлов с помощью неразрушающего химико-аналитического метода – рентгенофлуоресцентного анализа. Особенность методики в том, что, в отличие от стандартных подходов, в которых с помощью трудоемких и дорогостоящих методик с кислотным разложением проб (атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционной спектрометрии) исследуются концентрации поллютантов, перешедшие в раствор (что требует анализа водных вытяжек), в данном случае изучаются изменения концентраций в твердом остатке проб на фильтрах через определенные интервалы времени, что позволяет применять для анализа более экономичный метод рентгенофлуоресцентного анализа. Эффективность методики показана на примере исследований миграции меди и свинца в техногенных отходах, сформированных комплексным воздействием горноперерабатывающей и металлургической промышленности на одном из объектов в Иркутской области. Приведено сопоставление определения концентраций с помощью рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Показано, что результаты исследований абсолютно сопоставимы, при этом трудоемкость и стоимость предлагаемого подхода, а также требования к квалификации персонала, выполняющего пробоподготовку и анализ, существенно ниже. Предлагаемый способ позволяет оценить возможность миграции токсикантов в различных условиях – от краткосрочного воздействия атмосферных осадков до продолжительных воздействий воды. Представленные результаты визуализации позволяют быстро категоризировать пробы по особенностям протекания процесса вымывания водорастворимых форм.

**Ключевые слова:** подвижные формы металлов, миграция, рентгенофлуоресцентный анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, отходы горно-металлургических предприятий, загрязнение

**Для цитирования:** Сумкин А.А., Алексеев А.С., Трусова В.В., Качор О.Л., Паршин А.В. Об альтернативном экономичном подходе к определению высоких концентраций подвижных форм тяжелых металлов (на примере исследований экологического вреда отходов горно-металлургических предприятий) // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 4. С. 486–497. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-486-497>. EDN: FEQMET.

### Original article

## On alternative cost-effective approach to determining high concentrations of mobile heavy metals (on example of studies of environmental damage from mining and metallurgical waste)

Andrei A. Sumkin<sup>а</sup>, Ayaal S. Alekseev<sup>б</sup>, Valentina V. Trusova<sup>с✉</sup>,  
Olga L. Kachor<sup>д</sup>, Alexander V. Parshin<sup>е</sup>

<sup>а,с-е</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>б,е</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>б</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This article discusses a new, simple, and inexpensive method for determining high concentrations of water-soluble forms of heavy metals using a non-destructive chemical analytical method – an X-ray fluorescence analysis. Unlike standard approaches, which employ labor-intensive and expensive acid digestion techniques (inductively coupled plasma



atomic emission spectrography, inductively coupled plasma mass spectrometry, and atomic absorption spectroscopy) to measure pollutant concentrations in solution (requiring analysis of aqueous extracts), this method studies changes in concentrations in the solid residue of samples on filters at specific time intervals that enables the use of a more cost-effective X-ray fluorescence analysis method. The effectiveness of this method is demonstrated on example of the study of copper and lead migration in man-made waste generated by the combined effects of the mining and metallurgical industries at one of the facilities in the Irkutsk region. The concentrations determined using X-ray fluorescence analysis and inductively coupled plasma atomic emission spectrography are compared. The study results are shown to be completely comparable, while the labor intensity and cost of the proposed approach, as well as the qualification requirements for the personnel performing sample preparation and analysis, are significantly lower. The proposed method allows to assess the potential for toxic agent migration under various conditions – from short-term exposure to precipitation to prolonged exposure to water. The visualization results presented enable rapid categorization of samples based on the leaching behavior of water-soluble forms.

**Keywords:** mobile forms of metals, migration, X-ray fluorescence analysis, inductively coupled plasma atomic emission spectrography, mining and metallurgical waste, pollution

**For citation:** Sumkin A.A., Alekseev A.S., Trusova V.V., Kachor O.L., Parshin A.V. On alternative cost-effective approach to determining high concentrations of mobile heavy metals (on example of studies of environmental damage from mining and metallurgical waste). *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(4):486-497. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-486-497>. EDN: FEQMET.

### Введение

В настоящее время в российской горно-рудной индустрии все большее значение приобретает экологическая компонента. Это касается как оценки фонового состояния окружающей среды на новых площадях, так и оценки и рекультивации исторических отходов горнорудных, металлургических и т. п. производств, которые могут рассматриваться как объекты экологического вреда, а также и как техногенные месторождения. Серьезное техногенное загрязнение объектов окружающей среды объектами такого типа зачастую обусловлено крайне высокими содержаниями в объектах окружающей среды различных токсикантов. Высокий уровень ответственности за сохранение окружающей среды или за оценку ресурсов/запасов в таких объектах одинаково требует применения точных и достоверных аналитических методов химического анализа. Однако следует отметить, что развитие современной аналитической базы, применяющейся в горно-геологической индустрии, в последние десятилетия в основном было направлено на увеличение чувствительности методов на нижнем пределе определения, поскольку именно это необходимо для изучения естественных распределений различных химических элементов в земной коре, почве, горных породах и так далее. На смену полуколичественным методикам приходили методы атомно-эмиссионной спектроскопии с

индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС), атомной абсорбции, масс-спектрометрии, что позволяет обнаруживать даже самые небольшие концентрации веществ на уровне сотых ppm (мг/кг) и изучать соответствующие колебания естественного геохимического фона в природных объектах.

В то же время, когда речь заходит о загрязнениях, о техногенно нарушенных территориях, а особенно о непосредственных источниках такой опасной нагрузки в виде отходов, техногенных поверхностных образований, например с объектов накопленного вреда, встает необходимость достоверного и точного измерения очень высоких концентраций, в сотни и тысячи раз превышающих как геохимический фон, так и нормативные значения содержания. Упомянутые выше современные методы с применением кислотного разложения – ИСП-АЭС или атомно-абсорбционной спектроскопии, высокочувствительные методы дают хорошие результаты на низких диапазонах определения, но довольно жестко лимитированы их верхней границей. Так, например, методикой ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011<sup>1</sup> для исследования различных природных объектов спектральными методами, в том числе подвижных форм металлов в пробах почв, верхние пределы для основных тяжелых металлов-загрязнителей ограничены десятными долями процента (только для железа верхний предел – 10 %) даже с учетом значительных разбавлений в

<sup>1</sup> ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. М., 2011. 45 с.



десятки, сотни раз. Такие диапазоны зачастую перекрывают большинство исследовательских задач, но только если речь не идет о масштабном техногенном загрязнении объектов окружающей среды с концентрациями токсикантов, измеряемыми уже в процентах. В таких ситуациях применяются значительные многократные разбавления проб. Это дает возможность обнаружить фактическое содержание элементов в пробе, но такие действия приводят к высокой погрешности измерений. Таким образом, получается, что сложные и дорогостоящие измерения не обеспечивают ни высокую достоверность и информативность, ни высокую оперативность и экономическую целесообразность применения указанных методов.

В то же время в последние несколько лет наблюдается значительный прогресс в области неразрушающих методов анализа. Метод неразрушающего контроля – рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), применяемый для установления валового содержания элементов, позволяет в разных режимах работать с пробами твердых объектов как с низкими концентрациями определяемых элементов («геохимические режимы») сейчас реализованы в последних поколениях рентгенофлуоресцентных спектрометров большинства ведущих производителей [1], так и с высокими (часто имеет название «горные режимы»). Метод РФА является быстрым, бюджетным, не требующим сложной пробоподготовки, кроме истирания и в некоторых случаях прессования. В то же время часто считается, что метод РФА является, скорее, полуколичественным и не обеспечивает высокой точности измерений. В большом количестве современных публикаций доказываются возможности современных реализаций РФА в кейсах геохимических/геологических поисков, при исследовании керна, в других задачах определения валовых концентраций, и из этих публикаций зачастую становится очевидным, что для многих целей методы с кислотным разложением уже не нужны [2–6].

В данной же работе рассматривается несколько иной спектр проблем. Во многих исследовательских и практических задачах есть необходимость установления водорастворимых форм элементов, например, чтоб смоделировать ситуацию вымывания токсичных компонентов атмосферными осадками [7–9], моделировать миграцию в почвы [10–11], рас-

тения [12, 13], исследовать миграцию в водоемы [14], решать медико-экологические [15] и многие другие задачи [16]. Кроме того, существует необходимость подсчета процентного соотношения водорастворимых и труднорастворимых форм для того, чтобы можно было оценить реальное количество мигрирующих в объекты окружающей среды элементов относительно общей массы техногенных образований с известным валовым содержанием токсикантов. Авторы предлагают новую методику определения водорастворимых форм элементов, ее эффективность будет рассмотрена на типичном для горно-металлургической индустрии кейсе оценки состояния окружающей среды, загрязненной рядом типичных тяжелых металлов, извлеченных из руд, и продуктов их переработки целым рядом исторических горно-металлургических и химических производств.

В данной работе представлен альтернативный недорогой вариант установления соотношения водорастворимых и труднорастворимых форм тяжелых металлов в природно-техногенных объектах, подходящий для исследовательских работ.

Решаемая задача состоит в том, чтобы полностью перейти на неразрушающий метод контроля при оценке не только валовых, но и водорастворимых форм.

Объектом исследования были выбраны пробы технозема с наиболее загрязненных мест обследуемой нами промзоны г. Свирска Иркутской области, загрязненной вследствие деятельности бывшего предприятия по переработке сульфидосодержащих мышьяковистых руд «Ангарский металлургический завод», и завода по производству аккумуляторов «Востсибэлемент» (основным загрязнителем является свинец) в количестве 16 штук (рис. 1).

Данный объект отличается крайне неравномерной картиной загрязнения с очень высокими валовыми содержаниями приоритетных токсикантов [17, 18]. Важно отметить, что характер загрязнения и сама задача являются довольно типичными для горно-металлургического комплекса – имеется историческое загрязнение верхней части почвы на глубину до 1,5–2 метров комплексом тяжелых металлов, отходы находятся под открытым небом. Токсиканты из них как с поверхностным стоком, так и проникая в подземные воды, могут попадать в водные объекты (в данном случае в реку Ан-



**Рис. 1. Схематическая карта отбора проб:**

1 – наиболее опасные предприятия; 2 – точки отбора проб (справа вверху от точки – номер этой пробы);  
3 – сеть отбора проб; 4 – границы бывшей промплощадки

**Fig. 1. Schematic sampling map:**

1 – the most hazardous enterprises; 2 – sampling points (the sample number is to the upper right of the point);  
3 – sampling network; 4 – boundaries of the former industrial site

гару, на берегу которой находится изучаемая территория). Таким образом, результаты работы имеют не только общеметодический, но и вполне практический характер.

### Материалы и методы исследования

Современные аттестованные методики определения водорастворимых форм предполагают работу с водной вытяжкой, а, соответственно, рентгеновские методы анализа для такого объекта исследований использовать весьма сложно. Приготовление водной вытяжки предполагает смешение навески пробы и дистиллированной воды в соотношении 1:5 с последующим взбалтываем полученной суспензии на шейкере в течение 15 минут. Далее вытяжку фильтруют через двойной фильтр «белая лента» и проводят определение элементов в полученном фильтрате с помощью методов ИСП-АЭС, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционной спектрометрии с плазменной и электротермической атомизацией (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011<sup>1</sup>).

Валовое содержание определяется с использованием концентрированной азотной кислоты, перекиси водорода с дальнейшей фильтрацией и замером элементов в фильтрате (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011<sup>1</sup>). Затем можно определить соотношение труднорастворимых и водорастворимых форм. Весь процесс требует высококвалифицированных специалистов, большого расхода реактивов, включая государственные стандартные образцы расход газа, что делает себестоимость анализа достаточно высокой. Конечно, можно комбинировать методы анализа и валовое содержание определять иными менее дорогостоящими методами, но, учитывая, что итоговый результат по оценке доли водорастворимых форм зависит от двух различных видов анализа, для снижения вероятной накопленной ошибки уместнее выполнять подобные исследования на одном оборудовании, одним оператором, одной партией реактивов. И когда речь идет об инициативных исследовательских проектах, это может стать серьезным ограничивающим фактором, например, на количество отобранных проб или на отсут-



ствие права на ошибку при планировании эксперимента. Данные ограничения, безусловно, будут существенно снижать общее качество исследования.

В предлагаемой нами методике подготовка отобранных проб заключалась в их квартовании методом кольца и конуса и отборе в шахматном порядке для создания более усредненных и представительных проб весом 10 г в количестве 4 штук на одну пробу, всего навесок 64 штуки.

Далее для оценки достоверности получаемых нами результатов анализа половина проб была одновременно исследована на валовые

содержания на атомно-эмиссионном спектрометре ThermoScientific 6300duo и на мобильном рентгенофлуоресцентном спектрометре Sciaps X200 Geo в аккредитованной в установленном порядке лаборатории Сибирской школы геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия). Результаты были обчислены в соответствии с ОСТ 41-08-214-04<sup>2</sup>, который предназначен к применению в лабораториях ведомств, осуществляющих поисково-разведочные работы, добычу и переработку минерального сырья, а также изучение объектов окружающей среды. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1. Сравнительные результаты исследования проб на содержание меди методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и рентгенофлуоресцентного анализа**

**Table 1. Comparative results of copper content analysis using inductively coupled plasma atomic emission spectrography and X-ray fluorescence analysis methods**

Номер пробы	ИСП-АЭС		РФА		$K_k = C - C_k$	$K_m$	$K_k \leq K_m$
	Содержание $C$ , ppm	Относительная погрешность измерения	Содержание $C_k$ , ppm	Относительная погрешность измерения			
14/2	157,8	37,8672	151,2	45,36	6,58	59,089	Да
0	71,7	21,51	81,6	24,48	9,9	32,588	Да
22/1	92,4	27,726	106,0	31,8	13,58	42,19	Да
33/5	77,1	23,124	116,2	34,86	39,12	41,832	Да
29/1	82,2	24,654	97,5	29,25	15,32	38,254	Да
4с	59,7	17,922	85,6	25,68	25,86	31,315	Да
8b	51,2	15,354	55,3	16,59	4,12	22,605	Да
100 В	61,9	18,576	87,8	26,34	25,88	32,231	Да

**Таблица 2. Сравнительные результаты исследования проб на содержание свинца методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и рентгенофлуоресцентного анализа**

**Table 2. Comparative results of lead content analysis using inductively coupled plasma atomic emission spectrography and X-ray fluorescence analysis methods**

Номер пробы	ИСП-АЭС		РФА		$K_k = C - C_k$	$K_m$	$K_k \leq K_m$
	Содержание $C$ , ppm	Относительная погрешность измерения	Содержание $C_k$ , ppm	Относительная погрешность измерения			
14/2	929,6	223,104	1048,6	146,804	119	267,0708	Да
0	1931,6	309,056	1824,9	255,486	106,7	400,9847	Да
22/1	1380,2	220,832	1152,5	161,35	227,7	273,497	Да
33/5	5650	904	6341,5	570,735	691,5	1069,09	Да
29/1	2254	360,64	2230,9	245,399	23,1	436,2131	Да
4с	333	79,92	405,9	85,239	72,9	116,8456	Да
8b	271,8	65,232	312,15	65,5515	40,35	92,47818	Да
100 В	24060	3849,6	25526	1199,722	1466	4032,214	Да

<sup>2</sup> ОСТ 41-08-214-04. Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Внутренний лабораторный контроль точности (правильности и прецизионности) результатов количественного химического анализа. Введ. 01.06.2005. 92 с.



По полученным результатам, отраженным в табл. 1 и 2, внутренний оперативный контроль по двум методикам измерения признан удовлетворительным. Соответственно, результаты анализа имеющихся проб, полученные с РФА, ничем не уступают более долгим и дорогостоящим результатам, полученным на ИСП-АЭС.

### Результаты исследования и их обсуждение

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: пробу весом 10 г помещали в емкость объемом 300 мл, добавляли дистиллированную воду 100 мл, хорошо перемешивали, после чего оставляли на 2, 4, 6, 8 часов. После каждой временной отметки пробу фильтровали через фильтр «белая лента» для разделения пробы на твердую и жидкую фазу (рис. 2). Интерес представляет именно твердая фаза. В отличие от традиционной методики установления водорастворимых форм исследованием фильтрата, мы по твердой фазе оцениваем, какое количество вещества не перешло в фильтрат, т. е. осталось в труднорастворимых соединениях в твердой фазе.

После фильтрования фильтры с осадком высушивали, пересыпали в полиэтиленовые



Рис. 2. Процесс фильтрации пробы  
Fig. 2. Sample filtration process

пакеты и затем подвергали дальнейшим исследованиям. Результаты экспериментов по некоторым пробам представлены на рис. 3, 4 и в табл. 3.

Такой способ отмывки позволяет оценить возможность миграции токсикантов в различных условиях – от краткосрочного воздействия атмосферных осадков (отмывка на 2 часа) до продолжительных паводков или наводнений (отмывка на 8 часов). Также подобная визуализация (см. рис. 3, 4) позволяет быстро категорировать пробы по особен-

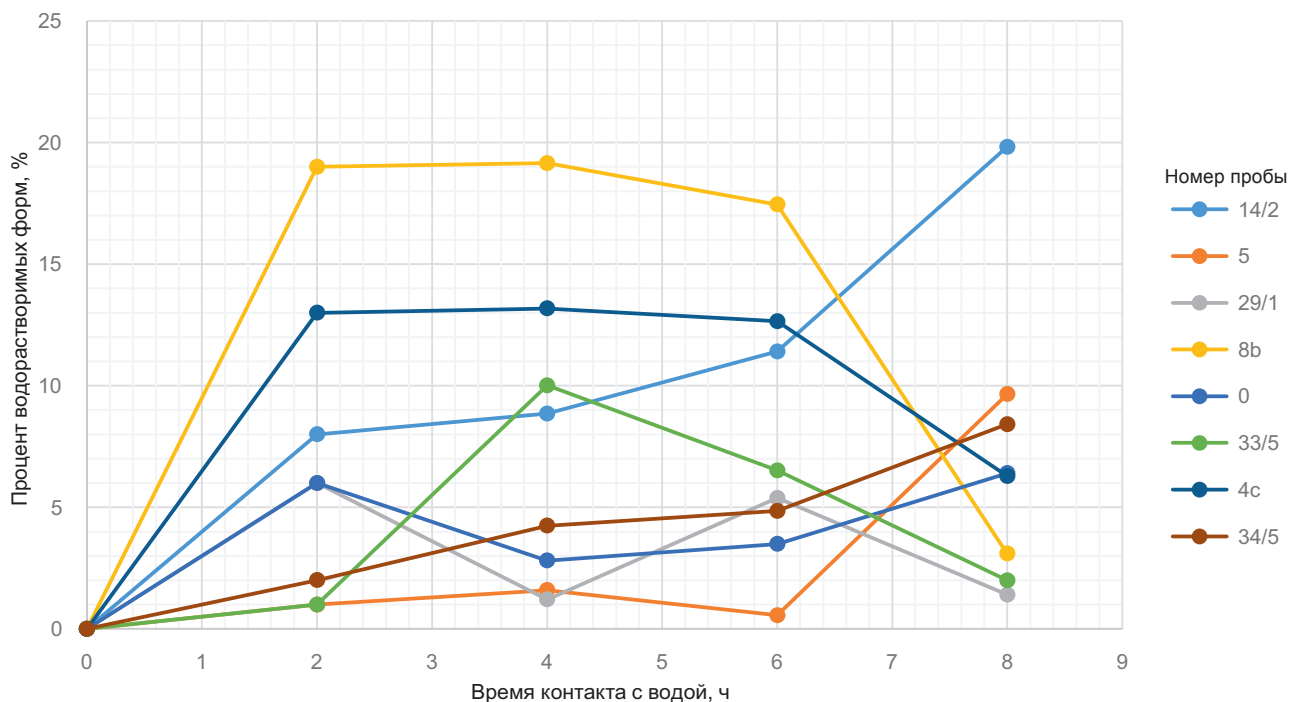
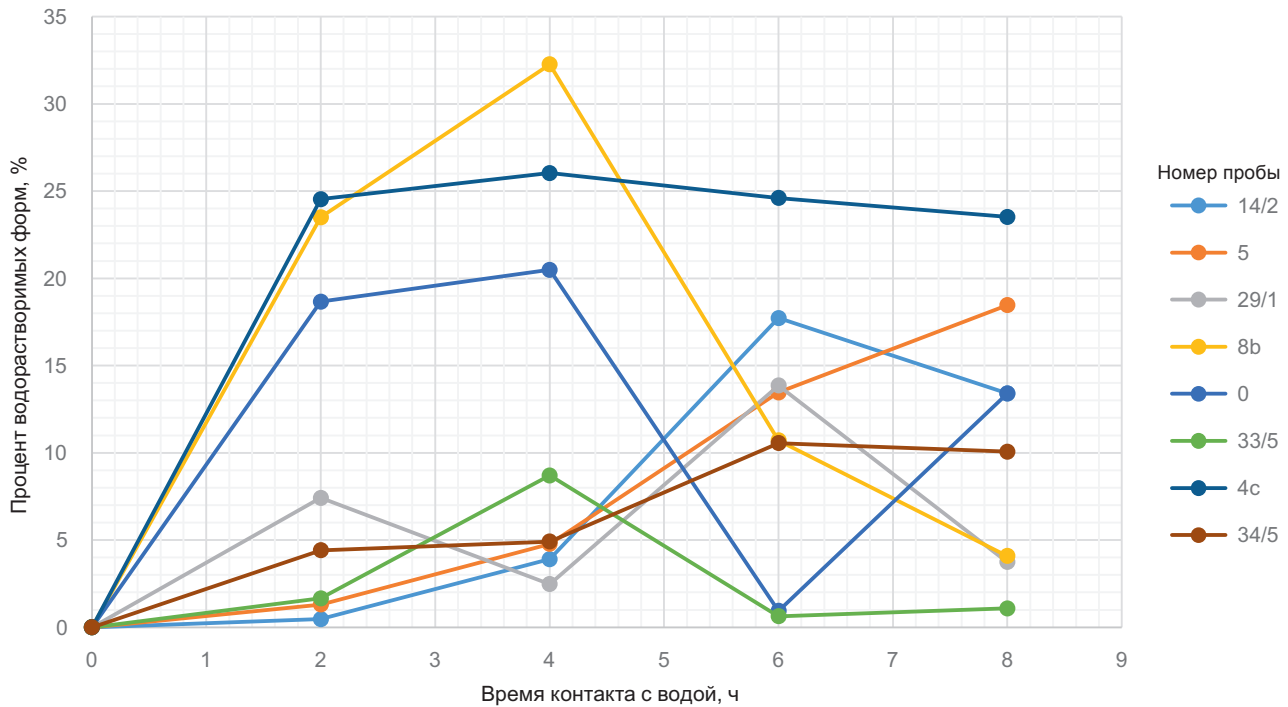


Рис. 3. График изменения процентного содержания водорастворимых форм свинца при разной продолжительности контакта с водой для восьми обследованных проб  
Fig. 3. Graph of changes in the percentage content of water-soluble forms of lead with different duration of contact with water for eight examined samples



**Рис. 4. График изменения процентного содержания водорастворимых форм меди при разной продолжительности контакта с водой для восьми обследованных проб**  
**Fig. 4. Graph of changes in the percentage content of water-soluble forms of copper with different duration of contact with water for eight examined samples**

**Таблица 3. Результаты проведенной отмывки пробы № 22/1**  
**Table 3. Results of sample No. 22/1 washing**

Показатель	Содержание, ppm	
	свинца	меди
Валовое содержание	1152,52	106,03
Содержание в твердом остатке на фильтре через 2 ч	1030,49	87,55
Содержание в твердом остатке на фильтре через 4 ч	944,29	79,71
Содержание в твердом остатке на фильтре через 6 ч	927,79	79,71
Содержание в твердом остатке на фильтре через 8 ч	1112,37	92,34

ностям протекания процесса вымывания водорастворимых форм. Так, из представленных рисунков видно, что в некоторых пробах (с определенных участков) основная доля водорастворимых форм переходит в фильтрат уже в первые два часа, а потом снова начинает сорбироваться на твердой поверхности технозема. В других пробах с других участков максимальное количество водорастворимых форм переходит в фильтрат только к 8-му часу эксперимента. В дальнейшем эта информация позволит подбирать технологии работ по рекультивации данной территории с учетом особенностей каждого техногенного участка. Такую информацию мы бы не смогли получить, применяя стандартную методику определения водорастворимых форм на ИСП-АЭС, поскольку в этом случае мы бы получили только итоговый ре-

зультат, который, как показано, не содержит информацию о ходе совершенно нелинейного процесса.

### Заключение

Представленный в ходе эксперимента способ установления водорастворимых форм отличается от распространенных аттестованных методик тем, что анализируется не фильтрат, а твердый остаток на фильтре, т. е. процент водорастворимых форм рассчитывается относительно валового содержания элемента в пробе и того его количества, которое останется в пробе после ее контакта с водой. Такой способ не требует сложной пробоподготовки и химических реактивов, а с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора измерения может проводить подготовленный штатный исследова-



тель без химического образования. Себестоимость таких работ минимальна, что делает их крайне актуальными при проведении инициативных исследований. Низкая себестои-

мость позволяет усложнять экспериментальную часть, значительно увеличивая количество проб, например варьирование времени контакта твердой фазы с водой.

#### Список источников

1. Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 390–401. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXU1B.
2. Аветисян С.Р., Бураева Е.А., Новиковский Н.М. Элементный состав некоторых горных и степных почв Юга европейской части России // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2017. № 3-1. С. 62–68. EDN: ZOKXJX.
3. Яценко Е.А., Гольцман Б.М., Трофимов С.В., Лазоренко Г.И. Переработка золошлаковых отходов сжигания угольных топлив на ТЭЦ Арктической зоны России с получением пористых геополлимерных материалов // Теплоэнергетика. 2022. № 8. С. 72–81. <https://doi.org/10.56304/S0040363622070104>. EDN: VSDYWE.
4. Таланова В.Н., Лепендина О.Л., Китаева Д.Х., Кабаева Н.М., Таказова Р.У., Буяновская А.Г. Экспресс-метод рентгенофлуоресцентного анализа интеркаляционных соединений на содержание кобальта и молибдена // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 8. С. 12–18. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-12-18>. EDN: CLYXSG.
5. Лолаев А.Б., Гурбанов А.Г., Дзедоев С.О., Оганесян А.Х., Илаев В.Э. Оценка степени загрязнения тонкодисперсным материалом с ложа Мизурского хвостохранилища почв, равнин, сельхозугодий Алагирского района // НТК-2016. Научно-техническая конференция обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) (г. Владикавказ, 5 июля 2016 г.). Владикавказ: Изд-во СКГМИ (ГТУ), 2016. С. 36–38. EDN: WIKJZZ.
6. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Элементный состав почв и пылевого аэрозоля юго-центральной части Таджикистана // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 3. С. 246–255. EDN: TJAFTH.
7. Дьякова Н.А. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах некоторых агроценозов Воронежской области // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2025. № 3. С. 25–32. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17563615>. EDN: RSWHWH.
8. Аристархова Е.В., Петренко Д.Б. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве г. Воскресенска // Развитие естественных наук и образования в России. Химия, биология, география, экология, образование: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции памяти ученого-энциклопедиста Д.И. Менделеева (г. Мытищи, 16 февраля 2024 г.). М.: Государственный университет просвещения, 2024. С. 8–11. EDN: FBVTBC.
9. Кошельков А.М., Майорова Л.П., Кузнецова А.А. Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почв Ванино-Токинской агломерации // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: материалы XI научно-практической конференции с международным участием (г. Хабаровск, 28 апреля 2022 г.). Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022. Вып. 11. С. 64–69. EDN: SVZDZY.
10. Неведров Н.П., Борисичев О.А. Геоинформационное моделирование распределения тяжелых металлов в почвах города Курска // Auditorium. 2017. № 3. С. 36–45. EDN: ZQIVFT.
11. Гололобова А.Г. Исследование пространственного распределения микроэлементов в почвах методом многомерного статистического анализа (на примере территории Далдынского кимберлитового поля, Северо-Западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. С. 89–103. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3875>. EDN: TGRUNK.
12. Колобов А.П. Распределение подвижных форм тяжелых металлов в горизонтах почв южной тайги (Тюменская область) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 2. С. 142–148. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/142-148>. EDN: TTCTDT.
13. Толкач О.В. Мониторинг распределения по профилю почв сосновых насаждений г. Первоуральска (Свердловская область) ионов меди, свинца и цинка в зоне техногенного воздействия // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2022. Т. 32. № 3. С. 303–311. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311>. EDN: FVJWLH.
14. Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А., Абакумова Н.В., Родькина И.А. Содержание и распределение тяжелых металлов в донных отложениях плесов Иваньковского водохранилища // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 1. С. 7–11. <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2023-1-7-11>. EDN: NRYJKR.
15. Ашурбекова Т.Н., Мусинова Э.М. Изучение загрязнения почвы тяжелыми металлами и оценка связи этого загрязнения с онкологическими заболеваниями // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7. № 4. С. 10–14. <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2018-14101>. EDN: VNQOZE.
16. Коняев И.С., Прокопенко И.В., Сулиманкина М.Г. Миграции тяжелых металлов в зависимости от элементов рельефа // Антропогенная трансформация природной среды. 2010. № 1. С. 381–386. EDN: WKXEAP.
17. Качор О.Л., Трусова В.В., Гантимурова С.А., Горячев И.Н., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохими-



ческое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 66–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.

18. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.

### References

1. Kuznetsova O.V., Kachor O.L., Matyuhin I.A., Ikramov Z.L., Parshin A.V. Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional spectral methods in geochemical prospecting. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):390-401. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXIYB.

2. Avetisyan S.R., Buraeva E.A., Novikovskiy N.M. Elemental composition of some mountainous and steppe soils of the south European part of Russia. *Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. Natural sciences*. 2017;3-1:62-68. (In Russ.). EDN: ZOKXJX.

3. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Trofimov S.V., Lazorenko G.I. Processing of ash and slag waste from coal fuel combustion at CHPPS in the Arctic zone of Russia with obtaining porous geopolymer materials. *Thermal Engineering*. 2022;8:72-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0040363622070104>. EDN: VSDYWE.

4. Talanova V.N., Lependina O.L., Kitaeva D.K., Kabaeva N.M., Takazova R.U., Buyanovskaya A.G. Rapid X-ray fluorescence analysis of intercalation compounds for molybdenum and cobalt content. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(8):12-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-12-18>. EDN: CLYXSG.

5. Lolaev A.B., Gurbanov A.G., Dzeboev S.O., Oganesyanyan A.K., Ilaev V.E. Assessment of the degree of contamination of soils, plains, and agricultural lands of the Alagir district with finely dispersed material from the bed of the Mizur tailings dump. In: *NTK-2016. Scientific and technical conference of students and young scientists of the North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)*. 5 July 2016, Vladikavkaz. Vladikavkaz: North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University); 2016, p. 36-38. (In Russ.). EDN: WIKJZZ.

6. Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I., Madvaliev U., Davlatshoev T. The elemental composition of soil and dust aerosol in south-central part of Tajikistan. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015;28(3):246-255. (In Russ.). EDN: TJAFTH.

7. Dyakova N.A. Content of heavy metals and arsenic in soils of some agrocenoses of Voronezh region. *Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region*. 2025;3:25-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17563615>. EDN: RSWHWH.

8. Aristarkhova E., Petrenko D. Content of mobile species heavy metals in the soil of Voskresensk. In: *Development of natural sciences and education in Russia. Chemistry, biology, geography, ecology, education: collected materials of the All-Russian scientific and practical conference in memory of the encyclopedist scientist D.I. Mendeleev*. 16 February 2024, Mytishchi. Moscow: State University of Enlightenment; 2024, p. 8-11. (In Russ.). EDN: FBJTBC.

9. Koshel'kov A.M., Majorova L.P., Kuznetsova A.A. Assessment of the heavy metal pollution level in the soils of the Vanino-Tokinsk agglomeration. In: *Philosophy of modern nature management in the basin of the Amur River: Proceedings of the 11<sup>th</sup> scientific and practical conference with international participation*. 28 April 2022, Khabarovsk. Khabarovsk: Pacific State University; 2022, Iss. 11, p. 64-69. (In Russ.). EDN: SVZDZY.

10. Nevedrov N.P., Borischev O.A. Geoinformation modeling of heavy metal distribution in Kursk soils. *Auditorium*. 2017;3:36-45. (In Russ.). EDN: ZQIVFT.

11. Gololobova A.G. Investigation of the spatial distribution of microelements in soils by the method of multivariate statistical analysis (on the example of the territory of the Daldyn kimberlite field, Northwestern Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(3):89-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3875>. EDN: TGRUNK.

12. Kolobov A.P. Distribution of mobile forms of heavy metals in soil horizons of the southern taiga (Tyumen region). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2025;2:142-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/142-148>. EDN: TTCTDT.

13. Tolkach O.V. Monitoring of copper, lead and zinc ions distribution along the soil profile of pine plantations in the city of Pervouralsk (Sverdlovsk region) in the zone of technogenic impact. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2022;32(3):303-311. (In Russ.). <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2022-32-3-303-311>. EDN: FVJWLH.

14. Tolkachev G.Yu., Ilina T.A., Abakumova N.V., Rodkina I.A. The content and distribution of heavy metals in the bottom sediments of the Ivankovo reservoir ples. *Melioration and Water Management*. 2023;1:7-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2023-1-7-11>. EDN: NRYJKR.

15. Ashurbekova T.N., Musinova E.M. The study of heavy metal pollution in soils and the link between pollution and oncological diseases. *Samara Journal of Science*. 2018;7(4):10-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2018-14101>. EDN: VNQOZE.

16. Konyaev I.S., Prokopenko I.V., Sulimankina M.G. Migration of heavy metals according to the elements of relief. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2010;1:381-386. (In Russ.). EDN: WKXEAP.



17. Kachor O.L., Trusova V.V., Gantimurova S.A., Goryachev I.N., Ikramov Z.L., Parshin A.V. The former industrial site of the Angarsk metallurgical plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):66-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.

18. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geocological assessment of accumulated damage objects. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;4:65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.

### Информация об авторах / Information about the authors



**Сумкин Андрей Александрович,**

студент,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
[andrey.sumkin.00@mail.ru](mailto:andrey.sumkin.00@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-7581-5180>

**Andrei A. Sumkin,**

Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
[andrey.sumkin.00@mail.ru](mailto:andrey.sumkin.00@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-7581-5180>



**Алексеев Аяал Семенович,**

аспирант,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
младший научный сотрудник лаборатории обогащения  
минерального сырья,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
г. Иркутск, Россия,  
[jr.alexeev@gmail.com](mailto:jr.alexeev@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>

**Ayaal S. Alekseev,**

Postgraduate Student,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
Junior Researcher of the Mineral Raw Materials Processing Laboratory,  
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
Irkutsk, Russia,  
[jr.alexeev@gmail.com](mailto:jr.alexeev@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>



**Трусова Валентина Валерьевна,**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник департамента геоэкологии,  
институт Сибирская школа геонаук,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [vvtrusova@geo.istu.edu](mailto:vvtrusova@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

**Valentina V. Trusova,**

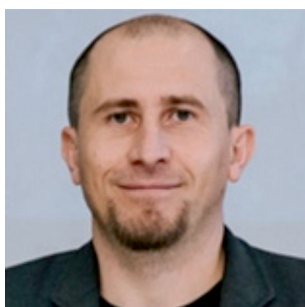
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Geoecology Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [vvtrusova@geo.istu.edu](mailto:vvtrusova@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

**Качор Ольга Леонидовна,**

доктор технических наук,  
руководитель департамента геоэкологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
olgakachor@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

**Olga L. Kachor,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Head of Geoecology Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
olgakachor@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

**Паршин Александр Вадимович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
проректор по геологии, наукам о Земле и окружающей среде,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования  
и геохимических методов поисков,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
sarhin@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

**Alexander V. Parshin,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Vice-Rector for Geology & Earth and Environmental Sciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation  
and Geochemical Prospecting Methods,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
sarhin@geo.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

А.А. Сумкин – проведение исследования, визуализация.

А.С. Алексеев – разработка методологии, курирование данных, написание черновика рукописи.

В.В. Трусова – административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи.

О.Л. Качор – валидация результатов, написание черновика рукописи.

А.В. Паршин – курирование данных, редактирование рукописи.

Andrei A. Sumkin – investigation, visualization.

Ayaal S. Alekseev – methodology, data curation, writing – original draft.

Valentina V. Trusova – project administration, writing – original draft.

Olga L. Kachor – validation, writing – original draft.

Alexander V. Parshin – data curation, writing – editing.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

А.В. Паршин является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2023 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Alexander V. Parshin has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2023, but she did not take part in making decision about publishing the present article. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The author does not report any other conflicts of interests.



*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 12.11.2025; одобрена после рецензирования 28.11.2025; принята к публикации 17.12.2025.

The article was submitted 12.11.2025; approved after reviewing 28.11.2025; accepted for publication 17.12.2025.