

УДК 504.42

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ИЗОТОПАМИ УРАНА СНЕГА И ГРУНТОВЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ (СЕВЕРО-ЗАПАД РОССИИ)

**Е. Н. Зыкова\***, **С. Б. Зыков**, **С. А. Игловский**, **Е. Ю. Яковлев**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (наб. Северной Двины, 109, Архангельск, Россия, 163000), \*elenazy@yandex.ru*

Представлены результаты геохимических исследований в районе Архангельской агломерации. Целью работы являлось изучение содержания тяжелых металлов и изотопов урана в снежном покрове и грунтовых водах. Содержание тяжелых металлов в образцах снега и грунтовых вод определяли методом масс-спектрометрии. По убыванию частоты встречаемости в пробах грунтовых вод средние концентрации тяжелых металлов (мкг/л) составляют следующий геохимический ряд: Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02). Значения содержания тяжелых металлов сравнивались со значениями, установленными ВОЗ. Допустимые пределы для Fe и Mn были превышены, для других металлов отмечались концентрации ниже ПДК. Исследование содержания тяжелых металлов в снеге показало их миграцию в грунтовые воды после снеготаяния. Концентрации железа и марганца в подземных водах десятикратно превышали их значения в снеге. Концентрации Zn, Cr, Ni, Cu, Ti, V, Pb, As, Co, Mo, Sb и Cd в снеге были сопоставимы с концентрациями в подземных водах. По значениям суммарного загрязнения снега наиболее загрязненными оказались пригородные территории Архангельска – 216,91 мг/м<sup>2</sup>.

Ключевые слова: водорастворимые формы; альфа-активность; масс-спектрометрия; предельно допустимые концентрации

Для цитирования: Зыкова Е. Н., Зыков С. Б., Игловский С. А., Яковлев Е. Ю. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и изотопами урана снега и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации (Северо-Запад России) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 18–30. doi: 10.17076/eco2056

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ гос. регистрации 125022002727-2, FUUW-2025-0011).

**E. N. Zykova\*, S. B. Zikov, S. A. Iglovsky, E. Yu. Yakovlev. ASSESSMENT OF SNOW AND GROUNDWATER POLLUTION WITH HEAVY METALS AND URANIUM ISOTOPES IN THE ARKHANGELSK AGGLOMERATION (NORTHWEST RUSSIA)**

*Federal Research Center for Integrated Study of the Arctic named after N. P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia), \*elenazy@yandex.ru*

The article presents the results of geochemical and radioecological studies in the Arkhangelsk agglomeration. Snow cover and groundwater samples for studying the content of heavy metals and uranium isotopes were taken within the bounds of the agglomeration. The content of heavy metals was determined by mass spectrometry. The average concentrations of heavy metals in groundwater samples form the following geochemical series in descending order ( $\mu\text{g/L}$ ): Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02). The values for heavy metals were compared with the WHO levels. The permissible limits were exceeded for Fe and Mn, while the concentrations of other metals were below the permissible limits. The study shows that heavy metals from the snow cover migrate to groundwater after snowmelt. The concentrations of iron and manganese in the groundwater were ten times that of the snow. Concentrations of Zn, Cr, Ni, Cu, Ti, V, Pb, As, Co, Mo, Sb and Cd in snow were comparable to those in groundwater. In terms of total snow contamination, the suburban areas of Arkhangelsk were the most polluted – 216.91 mg/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** water-soluble forms; alpha activity; mass spectrometry; maximum permissible concentrations

For citation: Zykova E. N., Zikov S. B., Iglovsky S. A., Yakovlev E. Yu. Assessment of snow and groundwater pollution with heavy metals and uranium isotopes in the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 18–30. doi: 10.17076/eco2056

**Funding.** The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state ID 125022002727-2, FUUW-2025-0011).

## **Введение**

Загрязнение различных экосистем тяжелыми металлами является очень распространенной проблемой, в основном связанной с атмосферным осаждением от выбросов предприятий теплоэнергетики, выхлопных газов автотранспорта, свалок, работой сельскохозяйственных, горнодобывающих и других промышленных предприятий [Попова, Боос, 2020; Федеральный..., 2020; Ануфриева и др., 2021]. Большая часть тяжелых металлов, выбрасываемых в атмосферу, попадает на поверхность с осадками, образуя аномалии тяжелых металлов в верхнем слое почвы [Методика..., 2013; WHO..., 2017; Двинских, 2020]. В холодное время года зоной транзита тяжелых металлов является снег, эффективный поглотитель загрязняющих веществ из атмосферы, особенно в северных регионах, где снежный покров держится 7–8 месяцев в году [Московченко и др., 2021; Першина и др., 2021]. Поэтому снежный покров широко

используется в качестве надежного показателя для оценки типа загрязнения воздуха и отслеживания относительного вклада различных источников загрязнителей воздуха [СанПиН 2.1.3684-21, 1.2.3685-21; Azimi, 2004; Bacardi, Camarero, 2010]. Тяжелые металлы, накопленные за долгую зиму (их растворимые формы), после таяния снега мигрируют в грунтовые воды и, распространяясь по водоносным горизонтам, оказывают значительное влияние на качество питьевой воды, что представляет значительный риск для населения [Котова и др., 2019; Yakovlev et al., 2020, 2022; Malov, 2024]. Изучение растворимых форм тяжелых металлов позволит оценить их биодоступность, проследить их распределение в экосистемах, миграцию в грунтовые воды и последующий перенос в колодцы с питьевой водой, а также оценить токсикологические качества воды, используемой населением. Такие исследования особенно актуальны вблизи крупных городов и крупных промышленных предприятий [Слуковский и др., 2020].

Высокие концентрации урана характерны для минерализованных подземных вод [Pilecka et al., 2017].

Целью данной работы являлось проведение оценки загрязнения тяжелыми металлами и изотопами урана снежного покрова и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации (северо-запад России).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) изучить физико-химические параметры грунтовых вод и снежного покрова Архангельской агломерации;

2) определить содержание тяжелых металлов в грунтовых водах и концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в снежном покрове Архангельской агломерации;

3) сопоставить полученные результаты со значениями ВОЗ и СанПиН для определения качества питьевой воды, а также степени загрязнения снежного покрова;

4) рассчитать значения суммарного площадного загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова Архангельской агломерации.

### **Характеристика района исследований**

Отбор проб грунтовых вод и снежного покрова проводился на пригородных территориях (природно-антропогенных ландшафтах), расположенных в пределах трех ключевых районов – в окрестностях городов Архангельска, Северодвинска и Новодвинска, которые образуют Архангельскую агломерацию, крупнейшую в российской Арктической зоне. В трех крупных городах агломерации – Архангельске, Северодвинске и Новодвинске сосредоточено большое количество промышленных предприятий: атомного судостроения, машиностроения, теплоэнергетики, целлюлозно-бумажной промышленности. Значительную долю в состав загрязнителей вносит автотранспорт, также функционируют полигоны твердых бытовых отходов [Перхурова, 2021]. Города Архангельской агломерации наряду с Норильском являются лидерами среди городов Арктической зоны России по уровню антропогенного загрязнения атмосферы [Ануфриева и др., 2021]. Оказывает влияние и глобальный атмосферный перенос загрязняющих веществ. Снежный покров служит индикатором атмосферного загрязнения, и существует серьезная опасность загрязнения снежного покрова и последующего загрязнения грунтовых вод растворимыми формами тяжелых металлов, так как первый от поверхности водоносный горизонт является открытой

системой и не защищен водоупорным слоем от проникновения загрязнителей. В связи с этим актуальной задачей выступает оценка качества грунтовых вод, используемых местным населением. Отбор проб снега и воды из скважин в исследуемых районах был проведен в марте в период максимального снегонакопления, который совпадает с зимним маловодьем для подземных вод.

Отобрано 9 проб снега на пригородной территории г. Северодвинска, 7 проб на пригородной территории г. Новодвинска, 5 проб в пригороде Архангельска на правом берегу р. Северной Двины напротив г. Новодвинска и по 5 проб грунтовых вод на каждой из указанных территорий – то есть в общей сложности 21 проба снега (С106–С126) и 15 проб воды из скважин и колодцев (KW7–KW21) (рис. 1).

### **Материалы и методы**

Отбор проб колодезной воды и снега производился в конце марта, когда мощность снежного покрова на поверхности почвы достигает максимальных значений, а на состав грунтовых вод оказывается минимальное влияние извне.

Все пробы воды отобраны из неглубоких колодцев глубиной от 1,2 до 6 м, выявляющих первый водоносный слой с поверхности [Borgmann, 2000]. Мощность снежного покрова в точках отбора изменялась от 55 до 78 см.

Пробы грунтовых вод для определения микроэлементов отбирали в полимерные пробирки объемом 50 мл, фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и подкисленный  $\text{HNO}_3$  до  $\text{pH} < 2$ . В пробах воды нестабильные физические и химические параметры, такие как pH, минерализация, электропроводность (Eh) и температура, измерялись непосредственно во время отбора проб. Температуру воды и минерализацию определяли с помощью измерителя Five Go Cond F3 (Mettler-Toledo GmbH, Швейцария); анализ pH и Eh проводили с помощью измерителя pH/ORP HI 9126 (Hanna Instruments, США) со сменным электродом.

Отбор проб снега осуществлялся с участков ( $S = 0,125 \text{ м}^2$ ) в пластиковые ведра объемом 11 л с использованием пластикового пробоотборника на всю глубину снежного покрова (за исключением нижнего 5-сантиметрового слоя, загрязненного подстилающими почвами). После доставки в лабораторию образцы снега растапливали при комнатной температуре в закрытых ведрах. Сразу после плавления проводились измерения нестабильных физических и химических параметров теми же методами, что и в грунтовых водах.

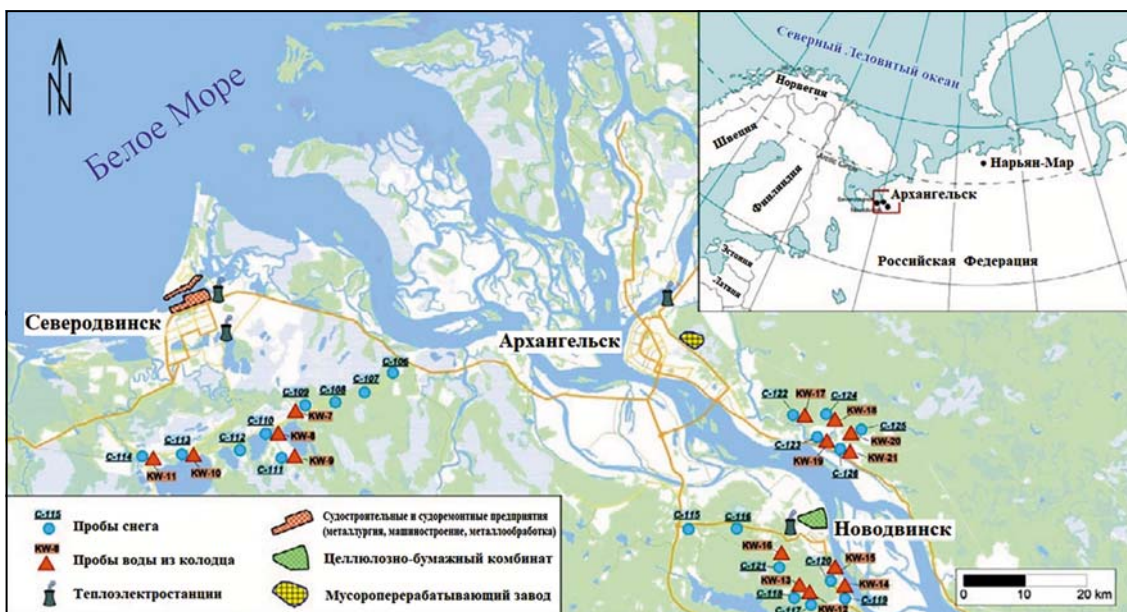


Рис. 1. Точки отбора проб снега и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации  
 Fig. 1. Snow and groundwater sampling points in the Arkhangelsk agglomeration

Анализ содержания тяжелых металлов в грунтовых водах и растворимых фракциях снега выполнен в лаборатории ЦКП НО «Арктика» САФУ имени М. В. Ломоносова (г. Архангельск) методом ICP-MS на приборе Aurora Elite (Bruker Daltonics, Inc.). Погрешность измерения составляла  $\pm 0,005$  мг/кг.

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты определения физико-химических параметров грунтовых вод Архангельской агломерации.

Для проб грунтовых вод, отобранных на пригородной территории Северодвинска, значения водородного показателя (рН) изменялись в пределах от 5,95 до 6,47, среднее значение составило 6,30. Для Новодвинского района значения рН варьировали от 6,80 до 8,38 со средним значением 7,60. Подземные воды в окрестностях Архангельска характеризовались минимальными изменениями значений рН – от 7,48 до 7,69 при среднем значении 7,60. Следует отметить, что в целом средние значения рН подземных вод для Архангельской агломерации находились в пределах диапазона, рекомендованного ВОЗ [WHO..., 2017].

Минерализация грунтовых вод в пригороде Северодвинска варьировала от 50,5 до 389 мг/л, среднее значение составило 246,2 мг/л. В окрестностях г. Новодвинска этот показатель находился в диапазоне от 27,5 до

685,3 мг/л при среднем значении 206,8 мг/л, в окрестностях Архангельска – от 424 до 1202 мг/л, среднее значение составило 739,6 мг/л, что более чем в 2 раза превышало среднюю минерализацию, характерную для пригородов Северодвинска и Новодвинска. В одном образце (KW17) минерализация превысила значения ПДК для питьевой воды в соответствии с российскими требованиями на 1000 мг/л. Повышенные значения минерализации в грунтовых водах в пригороде Архангельска были связаны с подпиткой колодезной воды из подземных вод с более высокой минерализацией и малой долей атмосферного пополнения из водоносного горизонта.

Электрическая проводимость (Eh) природной воды зависит от степени минерализации. Чем выше минерализация, тем выше значения проводимости. Эта зависимость прослеживается и в наших данных, что отражено в табл. 1. В окрестностях Новодвинска значения проводимости изменялись в довольно узком диапазоне от 134 до 165 мВ, со средним значением 147,2 мВ. Положительные средние значения Eh, характерные для грунтовых вод пригородов Северодвинска и Новодвинска, указывают на наличие в воде свободного кислорода, что более характерно для поверхностных вод [WHO..., 2017]. Отличающаяся картина установлена для подземных вод в окрестностях Архангельска, где отрицательные значения Eh были типичными для всех образцов (от  $-92$  до  $-17,2$  мВ, среднее значение  $-48,8$  мВ), что определяется

Таблица 1. Физико-химические параметры грунтовых вод Архангельской агломерации

Table 1. Physical and chemical parameters of groundwater in the Arkhangelsk agglomeration

Территории Territories	Проводимость, μСм/см Conductivity, μS/cm	Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	Водородный показатель, рН	Окислительно-восстановительный потенциал, мВ Oxidation-reduction potential, mV
	Среднее значение Average value			
Северодвинск Severodvinsk	402,00	246,20	6,30	134,50
Новодвинск Novodvinsk	419,00	206,80	7,60	147,20
Архангельск Arkhangelsk	1463,00	739,60	7,63	-48,80
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 16)				
Среднее значение Average value	682,67	361,23	7,14	95,52
Максимум Maximum	2389,00	1202,00	8,38	205,00
Минимум Minimum	57,00	27,50	5,95	-92,00
Размах вариации Range of variation	2332,00	1174,50	2,43	297,00
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	613,60	299,16	0,67	96,24
Среднеквадратичное отклонение генеральное General standard deviation	702,37	299,16	0,67	96,24
Среднеквадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	727,02	359,06	0,78	108,94
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	106,5	99,4	11,0	114,0



Рис. 2. Суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге и тяжелых металлов в подземных водах на территории Архангельской агломерации, мкг/л

Fig. 2. Total concentration of dissolved forms of heavy metals in snow and heavy metals in groundwater in the Arkhangelsk agglomeration, μg/l

как режим восстановления из-за присутствия сероводорода и низковалентных металлов в воде ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mo}^{4+}$ ,  $\text{V}^{4+}$ ,  $\text{U}^{4+}$ ) [WHO..., 2017].

Результаты определения физико-химических параметров снежного покрова Архангельской агломерации представлены в табл. 2. Значения pH в талых снеговых водах, отобранных в окрестностях Северодвинска, варьировали в диапазоне от 6,25 до 8,81 со средним значением 7,15; в пробах из Новодвинского района – от 6,37 до 8,85 (средн. 7,14), из окрестностей Архангельска – от 6,54 до 6,80 (средн. 6,67). В чистых атмосферных осадках для территории России pH находится в диапазоне от 5,5 до 6,5 [СанПиН 1.2.3685-21]. Во всех исследованных авторами районах средние значения pH были выше фонового диапазона, что указывает на значительный уровень ощелачивания снега, вероятно, связанный с выпадением частиц карбонатной пыли [Двинских, 2020].

Значения минерализации талого снега варьировали в пригороде Северодвинска от 4,58 до 10,6 мг/л (средн. 6,41 мг/л), в окрестностях

Новодвинска – от 6,5 до 18,2 мг/л (средн. 10,1 мг/л), в окрестностях Архангельска – от 6,2 до 8,88 мг/л (средн. 7,15 мг/л). Средневзвешенные значения минерализации в атмосферных осадках для фоновых территорий России не превышают 10–15 мг/л [Федеральный..., 2017], и установленные величины данного показателя в пригородных территориях Северодвинска и Архангельска находятся в этом диапазоне. В окрестностях Новодвинска значения минерализации местами превышали фоновые, что, вероятно, связано с работой целлюлозно-бумажного комбината, расположенного в черте города. Значения проводимости напрямую связаны с минерализацией снега, и в районе исследования они варьировали от 45 до 222 мВ, среднее значение составило 162,81 мВ.

В табл. 3 представлены результаты определения содержания тяжелых металлов в грунтовых водах Архангельской агломерации. Выявленные значения были сопоставлены с рекомендуемыми ВОЗ [WHO..., 2017] и СанПиН 1.2.3685-21 с целью определения качества воды.

Таблица 2. Физико-химические параметры снежного покрова Архангельской агломерации

Table 2. Physical and chemical parameters of the snow cover in the Arkhangelsk agglomeration

Территории Territories	Проводимость, μСм/см Conductivity, μS/cm	Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	Водородный показатель, pH	Окислительно-восстановительный потенциал, мВ Oxidation-reduction potential, mV
	Среднее значение Average value			
Северодвинск Severodvinsk	13,80	6,41	7,15	165,6
Новодвинск Novodvinsk	21,80	10,10	7,14	149,5
Архангельск Arkhangelsk	15,43	7,15	6,67	173,2
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 16)				
Среднее значение Average value	15,89	7,37	7,04	162,81
Максимум Maximum	39,41	18,20	8,85	222
Минимум Minimum	9,87	4,58	6,25	45
Размах вариации Range of variation	29,54	13,62	2,60	177
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	3,55	1,64	0,64	32,20
Среднеквадратичное отклонение генеральное General standard deviation	3,55	1,64	0,64	32,20
Среднеквадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	6,16	2,84	0,81	47,13
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	38,8	38,5	11,5	28,9

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов в грунтовых водах Архангельской агломерации, мкг/л  
 Table 3. Concentrations of heavy metals in groundwater of the Arkhangelsk agglomeration, µg/L

Территории Territories	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Mo	Pb	V	As	Sb	Fe	U
	Среднее значение Average value														
Северодвинск Severodvinsk	4,05	15,80	138,80	0,31	11,88	3,28	16,15	0,004	0,25	1,54	1,51	0,69	0,08	1454	0,09
Новодвинск Novodvinsk	1,13	15,52	108,70	0,33	12,36	2,95	43,14	0,07	0,25	0,07	0,79	0,40	0,10	332	0,75
Архангельск Arkhangelsk	1,75	16,56	1108,20	1,13	15,08	2,63	18	–	0,49	0,40	2,06	0,57	0,10	1187	1,93
Предельно допустимые концентрации Maximum permissible concentrations															
ПДК ВОЗ WHO maximum permissible concentrations	–	50	500	100	20	2000	300	3	70	10	–	10	50	300	300
ПДК СанПин maximum permissible concentrations according to SanPiN	100	50	500	100	100	1000	500	1	250	30	100	50	50	1000	150
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 19)															
Среднее значение Average value	2,48	16,08	426,38	0,58	12,76	2,99	24,24	0,02	0,32	0,97	1,50	0,39	0,09	809,33	0,91
Максимум Maximum	7	19,60	2468	2,02	18,40	6,92	118	0,17	0,78	2,68	3,21	0,96	0,20	2935	7,83
Минимум Minimum	0,90	14,00	3,10	0,18	9,50	1,13	6,70	0,00	0,13	0,16	0,19	0,01	0,04	124	0,02
Размах вариации Range of variation	6,10	5,60	2464,90	1,84	8,90	5,79	111,30	0,16	0,65	2,52	3,02	0,95	0,16	2811	7,81
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	1,49	0,94	486,25	0,37	2,30	1,11	17,61	0,02	0,14	0,75	0,56	0,25	0,04	463,29	1,26
Средне-квадратичное отклонение генеральное General standard deviation	1,80	1,32	676,52	0,49	2,64	1,55	27,44	0,04	0,19	0,86	0,76	0,29	0,05	668,45	2,02
Средне-квадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	1,87	1,36	700,26	0,51	2,73	1,60	28,40	0,04	0,20	0,89	0,78	0,30	0,05	691,91	2,09
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	75,40	8,50	164,20	88	21,40	53,50	117,20	285,3	60,10	92	52,2	76,60	57,6	85,50	229,2

По убыванию частоты встречаемости в пробах грунтовых вод средние концентрации тяжелых металлов (мкг/л) составляют следующий геохимический ряд: Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02).

Концентрация Fe изменялась от 124 до 2935 мкг/л, в среднем 809,33 мкг/л, а допустимый предел ВОЗ составляет 300 мкг/л, СанПин – 1000 мкг/л. Рассматривая распределение железа, можно видеть, что во всех пробах, взятых в окрестностях Северодвинска и Архангельска, концентрация Fe была существенно выше рекомендованных значений; в районе Новодвинска две пробы незначительно превышают нормы по железу.

Концентрации Mn варьировали от 3,1 до 2468 мкг/л, среднее значение составило 426,38 мкг/л при допустимых пределах 500 мкг/л по ВОЗ и СанПин. Во всех пробах грунтовых вод, взятых в пригородах Северодвинска и Новодвинска, его содержание не превышает ПДК, но в окрестностях Архангельска выявлены три пробы с аномально высокими значениями содержания Mn (KW19–KW21).

Содержание железа и марганца в почвах Архангельского промышленного района достаточно велико, особенно в почвах природно-антропогенных ландшафтов. Городские почвы имеют более легкий гранулометрический состав, чем почвы пригородных территорий, поэтому при промывном водном режиме, характерном для региона, железо и марганец в значительной степени вымываются из верхних слоев в нижележащие горизонты и грунтовые воды. Напротив, почвы ненарушенных пригородных территорий преимущественно глинистые и суглинистые с повышенным содержанием органического вещества, что способствует закреплению ТМ в их поверхностном слое [Евдокимова и др., 2012].

Концентрация Zn изменялась от 6,7 до 118 мкг/л, со средним значением 24,24 мкг/л. Во всех изученных образцах наблюдались довольно низкие его концентрации, относительно равномерное распределение по ключевым районам Архангельской агломерации, а максимальные концентрации цинка были значительно ниже допустимых пределов, установленных ВОЗ (300 мкг/л) и СанПиН (500 мкг/л).

Концентрации Cr в подземных водах варьировали в диапазоне от 14,0 до 19,6 мкг/л, среднее значение составило 16,08 мкг/л. Разница концентраций хрома в пробах грунтовых

вод из всех указанных районов была незначительной и превышения ПДК по ВОЗ (50 мкг/л) и СанПиН (50 мкг/л) не наблюдалось.

Содержание Ni в подземных водах Архангельской агломерации варьировало от 9,5 до 18,4 мкг/л при среднем значении 12,76 мкг/л, что ниже допустимых пределов его содержания по ВОЗ (20 мкг/л) и СанПиН (100 мкг/л). Максимальные концентрации остальных металлов (Cu, V, Pb, U, As, Co, Mo, Sb и Cd) были также значительно ниже ПДК (табл. 3).

В табл. 4 и на рис. 2 представлены результаты определения содержания водорастворимых форм тяжелых металлов в снежном покрове Архангельской агломерации. Средние концентрации (мкг/л) распределились в следующем порядке: Mn (104,22) > Fe (85,71) > Zn (17,10) > Cr (14,52) > Ni (9,83) > V (1,55) > Cu (1,05) > Ti (0,89) > Pb (0,39) > As (0,27) > Mo (0,2) > Co (0,16) > Sb (0,06) > Cd (0,02).

Поскольку содержание водорастворимых форм тяжелых металлов в снеге очевидно влияет на качество питьевой грунтовой воды, полученные величины также были сопоставлены с рекомендуемыми для питьевой воды по ВОЗ [WHO..., 2017] и СанПиН [СанПиН 1.2.3685-21]. Превышение фоновых значений установлено только для Mn в двух точках опробования – С-117 (636 мкг/л) и С-124 (1315 мкг/л) при ПДК 500 мкг/л. Концентрации всех остальных элементов не превышают предельно допустимых. Также выявлены очень низкие значения концентрации урана в снеге, составившие  $n \times 10^{-8}$  г/л. Поэтому полученные данные в таблицу не вошли.

На рис. 2 показана суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге и тяжелых металлов в подземных водах на территории Архангельской агломерации. Суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге имеет максимальные значения в окрестностях Архангельска (1358 мкг/л) и Новодвинска (679 мкг/л), а в окрестностях Северодвинска не превышает 94 мкг/л. Суммарная концентрация тяжелых металлов в подземных водах в окрестностях Архангельска составляет 2529 мкг/л, в Северодвинске – уже 306 мкг/л, в окрестностях Новодвинска не превышает 197 мкг/л. Окрестности Архангельска являются наиболее загрязненными по суммарной концентрации растворенных форм тяжелых металлов в снеге и в подземных водах.

В табл. 5 представлены данные о площадном загрязнении снежного покрова Архангельской агломерации тяжелыми металлами.

Таблица 4. Концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в пробах снега Архангельской агломерации, мкг/л

Table 4. Concentrations of water-soluble forms of heavy metals in snow samples from the Arkhangelsk agglomeration, µg/L

Территории Territories	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Mo	Pb	V	As	Sb	Fe
	Среднее значение Average value													
Северодвинск Severodvinsk	0,90	14,90	6,92	0,15	9,66	0,95	15,95	0,02	0,227	0,42	1,515	0,054	0,05	94,60
Новодвинск Novodvinsk	0,90	13,80	122,80	0,20	10,00	1,20	15,80	0,01	0,20	0,20	1,70	0,3	0,10	70,50
Архангельск Arkhangelsk	0,88	14,68	40,48	0,16	9,98	1,09	21,00	0,03	0,13	0,27	1,38	0,40	0,07	86,20
Предельно допустимые концентрации Maximum permissible concentrations														
ПДК ВОЗ WHO maximum permissible concentrations	–	50	500	100	20	2000	300	3	70	10	–	10	50	300
ПДК СанПиН maximum permissible concentrations according to SanPiN	100	50	500	100	100	1000	500	1	250	30	100	50	50	1000
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 19)														
Среднее значение Average value	0,89	14,52	104,22	0,16	9,83	1,05	17,10	0,02	0,20	0,39	1,55	0,27	0,06	85,71
Максимум Maximum	1,19	15,70	1315	0,24	10,60	2,36	33,00	0,06	0,67	1,50	4,65	0,75	0,07	118
Минимум Minimum	0,73	12,80	2,30	0,13	9,10	0,74	8,50	0,00	0,06	0,20	0,32	0,03	0,05	50
Размах вариации Range of variation	0,46	2,90	1312,70	0,11	1,50	1,62	24,50	0,06	0,61	1,30	4,33	0,72	0,02	68
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	0,09	0,55	165,96	0,02	0,31	0,24	5,16	0,02	0,11	0,20	0,79	0,19	0,01	11,24
Средне- квадратичное отклонение генеральное General standard deviation	0,11	0,76	301,58	0,03	0,39	0,36	6,60	0,02	0,15	0,34	1,06	0,23	0,01	15,87
Средне- квадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	0,11	0,78	309,03	0,03	0,40	0,37	6,77	0,02	0,15	0,35	1,08	0,23	0,01	16,27
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	12,80	5,40	296,50	16,00	4,10	35,10	39,60	91,30	78,50	91,40	70	87,70	15,30	19

Анализ общего площадного загрязнения для всех изученных металлов на 1 м<sup>2</sup> выявил наименьшую загрязненность снежного покрова в Северодвинском районе (~77 мг/м<sup>2</sup>), в то время как общий показатель загрязнения снега в Новодвинском и Архангельском районах был почти в три раза выше и составил 210,51 и 216,91 мг/м<sup>2</sup> соответственно.

По большинству элементов снежный покров в пригородах Архангельска и Новодвинска имел сопоставимые величины площадного загрязнения, в то время как Северодвинский район отличался низкими значениями. Близкие величины площадного загрязнения во всех трех ключевых районах имели Cr, Ni, Cu и Zn. Отличия в концентрациях тяжелых металлов, осаждаемых на 1 м<sup>2</sup>, между исследуемыми ключевыми районами связаны с разными

Таблица 5. Площадное загрязнение тяжелыми металлами снежного покрова Архангельской агломерации, мг/м<sup>2</sup>

Table 5. Surface contamination of the snow cover in the Arkhangelsk agglomeration by heavy metals, mg/m<sup>2</sup>

Металл Metal	Северодвинск Severodvinsk	Новодвинск Novodvinsk	Архангельск Arkhangelsk
Ti	2,500	10,757	9,134
Cr	1,017	1,409	1,196
Mn	2,976	15,205	17,722
Co	0,041	0,148	0,127
Ni	1,034	1,201	1,159
Cu	0,929	1,510	1,041
Zn	4,615	4,253	6,259
Cd	0,005	0,005	0,002
Mo	0,011	0,017	0,007
Pb	0,306	0,830	0,821
V	0,388	0,832	0,906
As	0,011	0,169	0,107
Sb	0,058	0,103	0,125
Fe	63,372	174,426	178,306
Σ (суммарно) Σ (total)	77,26	210,51	216,91

источниками загрязнения, удаленностью точек отбора проб от источников выбросов тяжелых металлов, различиями в направлении движения воздушных масс и рядом других факторов.

## Заключение

Анализ грунтовых вод Архангельской агломерации позволил установить, что средние значения водородного показателя соответствовали рекомендованным ВОЗ и СанПиН; повышенная минерализация грунтовых вод была связана с подпиткой колодезной воды подземными водами из пород, богатых железом и марганцем. Средние значения pH талого снега повсеместно превышали фоновые, что связано с загрязнением атмосферы выбросами промышленных предприятий и автотранспорта, содержащими щелочные и щелочноземельные элементы, повышающие щелочность снега. Значения минерализации снега превышали фоновые только в окрестностях Новодвинска, что связано с воздействием целлюлозно-бумажного комбината.

При сопоставлении значений содержания тяжелых металлов в грунтовых водах со значениями, рекомендованными ВОЗ и СанПиН, выявлено, что максимальные содержания железа превышают допустимый предел, установленный ВОЗ, в 9 раз, а установленный СанПин – в 3 раза. Концентрации марганца превышают допустимый предел по ВОЗ и СанПин в 5 раз в окрестностях Архангельска, не превышая ПДК на других территориях. Концентрации других металлов были ниже ПДК. Почвы ненарушенных пригородных территорий преимущественно глинистые и суглинистые с повышенным содержанием органического вещества. Это способствует закреплению ТМ в поверхностном слое и дальнейшей их миграции в грунтовые воды. Концентрации растворенных форм марганца в снежном покрове исследуемого района превышают допустимый предел, рекомендованный ВОЗ и СанПин, в 2,5 раза.

Показатели площадного загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами в пригородах Архангельска и Новодвинска были в три раза выше, чем в Северодвинском районе, за счет содержания Ti, Mn, Fe в атмосферных выбросах. Причины различий по этому показателю между исследуемыми районами связаны с разными источниками загрязнения, удаленностью точек отбора проб от источников выбросов тяжелых металлов, разнонаправленным движением воздушных масс.

## Литература

Ануфриева А. Ф., Безуглая Е. Ю., Загайнова М. С. и др. Состояние загрязнения атмосферы в городах России на 2020 год. СПб.: Росгидромет, 2021. 254 с.

Двинских С. А. Факторы формирования и элементы химического состава поверхностных вод: учеб.-метод. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет [Электронный ресурс]. Пермь, 2020. 77 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverxnostnyx-vod.pdf> (дата обращения: 23.12.2025).

Евдокимова В. П., Попова Л. Ф., Тюлева В. В., Бечина И. Н., Усачева Т. В. Особенности накопления железа и марганца в почвах городов Архангельской промышленной агломерации // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2012. № 4. С. 99–104.

Котова Е. И., Кузнецова И. А., Крячюнас В. В., Игловский С. А., Мироненко К. А., Бедрина Д. Д. Пространственное распределение меди, ванадия, никеля и свинца в почвах города Мончегорска // Успехи современного естествознания. 2019. № 12. С. 70–76.

Методика измерений объемной активности изотопов урана ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП ВИМС, 2013. 16 с.

Московченко Д. В., Пожитков Р. Ю., Соромтин А. В. Геохимические характеристики снежного покрова г. Тобольска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 5. С. 156–169. doi: 10.18799/24131830/2021/5/3195

Перхурова О. В. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2020 год. Архангельск: САФУ, 2021. 478 с.

Першина Н. А., Павлова М. Т., Полищук А. И., Семенец Е. С. Ежегодные данные о химическом составе и кислотности осадков. СПб.: Росгидромет, Амрит, 2021. 114 с.

Попова Л. Ф., Боос О. Д. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Архангельске // Молодой ученый. 2020. № 49(339). С. 488–490.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

Слуковский З. И., Гузева А. В., Григорьев В. А., Даувальтер В. А., Мицуков А. С. Палеолимнологическая реконструкция техногенного воздействия на экосистему оз. Большой Вудъявр (Кировск, Мурманская область, Артика): новые геохимические данные // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 4. С. 96–107. doi: 10.24412/1816-1863-2020-4-96-107

Федеральный закон от 29.07.2017 (с изменениями от 22.12.2020) «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Чагина Н. Б., Айвазова Е. А., Иванченко Н. Л., Варакин Е. А., Соболев Н. А. Исследование содержания тяжелых металлов в снеговом покрове г. Архангельска и их влияние на здоровье населения // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2016. № 4. С. 57–68. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.57

Azimi S. Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France: Doctoral dissertation, Ecole des Ponts Paris Tech. 2004. 289 с.

Bacardi M., Camarero L. Atmospherically deposited major and trace elements in the winter snowpack along a gradient of altitude in the Central Pyrenees: The seasonal record of long-range fluxes over SW Europe // Atmos. Environ. 2010. No. 44(4). С. 582–595. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.022

Borgmann U. Methods for assessing the toxicological significance of metals in aquatic ecosystems: bioaccumulation–toxicity relationships, water concentrations and sediment spiking approaches // Aquat. Ecosyst. Health Manag. 2000. No. 3. P. 277–289. doi: 10.1080/14634980008657027

Malov A. I. Assessment of water supply to the east European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks // Environ. Pollut. 2024. Vol. 360. Art. 124636. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124636

Pilecka J., Grinfelde I., Valujeva K., Straupe I., Purmalis O. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Jelgava // Rural and environmental engineering, landscape architecture. 2017. Vol. 1. P. 173–179. doi: 10.22616/rrd.23.2017.026

Prohaska T., Irrgeher J., Benefield J. et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) // Pure Appl. Chem. 2022. Vol. 94, iss. 5. P. 573–600. doi: 10.1515/pac-2019-0603

WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, fourth ed. incorporating the first addendum. Geneva, Switzerland, 2017. 631 с.

Yakovlev E., Zykova E., Zykov S., Druzhinina A., Ivanchenko N. Evaluation of heavy metal pollution of snow and groundwater on the territory of suburban community garden plots of the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia) // Pollution. 2022;8(4): 1448–1473. doi: 10.22059/POLL.2022.342253.1456

Yakovlev E. Y., Zykova E. N., Zykov S. B., Malkov A. V., Bazhenov A. V. Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia // Environ. Earth Sci. 2020;79(10):218. doi: 10.1007/s12665-020-08967-8

## References

- Anufrieva A. F., Bezuglaya E. Yu., Zagainova M. S. et al. State of air pollution in Russian cities in 2020. St. Petersburg: Rosgydromet; 2021. 254 p. (In Russ.)
- Azimi S. Sources, flux and atmospheric retombées in Ile-de-France: Dr. Sci. thesis. Paris: Ecole des Ponts Paris Tech; 2004. 289 p.
- Bacardi M., Camarero L. Atmospherically deposited major and trace elements in the winter snowpack along a gradient of altitude in the Central Pyrenees: The seasonal record of long-range fluxes over SW Europe. *Atmos. Environ.* 2010;44(4):582–595. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.022
- Borgmann U. Methods for assessing the toxicological significance of metals in aquatic ecosystems: bio-accumulation–toxicity relationships, water concentrations and sediment spiking approaches. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* 2000;3:277–289. doi: 10.1080/14634980008657027
- Chagina N. B., Aivazova E. A., Ivanchenko N. L., Varakin E. A., Sobolev N. A. Heavy metals in snow cover of Arkhangelsk and evaluation of their influence on population health. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki = Bulletin of Northern (Arctic) Federal University. Natural Sciences Series.* 2016;4:57–68. (In Russ.). doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.57
- Dvinskikh S. A. Factors of formation and elements of the chemical composition of surface waters: a study guide. Perm; 2020. 77 p. (In Russ.) URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverxnostnyx-vod.pdf>. (accessed: 23.12.2025).
- Evdokimova V. P., Popova L. F., Tyuleva V. V., Bechina I. N., Usacheva T. V. Features of iron and manganese accumulation in soils of the cities of the Arkhangelsk industrial agglomeration. *Vestnik MGOU. Ser. Estestvennye nauki = Bulletin of Moscow State University. Natural Sciences Series.* 2012;4:99–104. (In Russ.)
- Federal Law of July 29, 2017 (as amended on December 22, 2020) 'On the conduct of gardening and vegetable gardening by citizens for their own needs and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation'. (In Russ.)
- Kotova E. I., Kuznetsova I. A., Kryauchynas V. V., Iglovskii S. A., Mironenko K. A., Bedrina D. D. Spatial distribution of copper, vanadium, nickel and lead in the soils of the city of Monchegorsk. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences.* 2019;12:70–76. (In Russ.)
- Malov A. I. Assessment of water supply to the east European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks. *Environ. Pollut.* 2024;360:124636. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124636
- Methodology for measuring the volumetric activity of uranium ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ) in samples of natural (fresh and mineralized), industrial and waste water using the alpha-spectrometric method with radiochemical preparation. Moscow: VIMS; 2013. 16 p. (In Russ.)
- Moskovchenko D. V., Pozhitkov R. Yu., Soromotin A. V. Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering.* 2021;5:156–169. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2021/5/3195
- Perkhurova O. V. State and protection of the environment of the Arkhangelsk Region for 2020. Arkhangelsk: SAFU; 2021. 478 p. (In Russ.)
- Pershina N. A., Pavlova M. T., Polishchuk A. I., Semenets E. S. Annual data on the chemical composition and acidity of precipitation. Rosgydromet. St. Petersburg: Rosgydromet, Amirit; 2021. 114 p. (In Russ.)
- Pilecka J., Grinfelde I., Valujeva K., Straupe I., Purmalis O. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Jelgava. *Rural and environmental engineering, landscape architecture.* 2017;1:173–179. doi: 10.22616/rrd.23.2017.026
- Popova L. F., Boos O. D. Assessment of atmospheric air pollution in Arkhangelsk. *Molodoi uchenyi = Young Scientist.* 2020;49(339):488–490. (In Russ.)
- Prohaska T., Irrgeher J., Benefield J. et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2022;94(5):573–600. doi: 10.1515/pac-2019-0603
- SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans from environmental factors. (In Russ.)
- SanPiN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Guzeva A. V., Grigor'ev V. A., Dauval'ter V. A., Mitsukov A. S. Paleolimnological reconstruction of the technogenic impact on the ecosystem of Lake Bolshoi Vudjavr (Kirovsk, Murmansk Region, Arctic): new geochemical data. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii = Ecology of Urbanized Territories.* 2020;4:96–107. (In Russ.). doi: 10.24412/1816-1863-2020-4-96-107
- WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, fourth ed. incorporating the first addendum. Geneva, Switzerland; 2017. 631 p.
- Yakovlev E., Zykova E., Zykov S., Druzhinina A., Ivanchenko N. Evaluation of heavy metal pollution of snow and groundwater on the territory of suburban community garden plots of the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia). *Pollution.* 2022;8(4):1448–1473. doi: 10.22059/POLL.2022.342253.1456
- Yakovlev E. Y., Zykova E. N., Zykov S. B., Mal'kov A. V., Bazhenov A. V. Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia. *Environ. Earth Sci.* 2020;79(10):218. doi: 10.1007/s12665-020-08967-8

Поступила в редакцию / received: 22.01.2025; принята к публикации / accepted: 26.12.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Зыкова Елена Николаевна**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории экологической радиологии Института  
геодинамики и геологии

*e-mail: elenazy@yandex.ru*

### **Зыков Сергей Борисович**

научный сотрудник лаборатории экологической  
радиологии Института геодинамики и геологии

*e-mail: rigascientist@gmail.com*

### **Игловский Станислав Анатольевич**

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории экологической радиологии Института  
геодинамики и геологии

*e-mail: iglovskys@mail.ru*

### **Яковлев Евгений Юрьевич**

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией  
экологической радиологии Института геодинамики  
и геологии

*e-mail: yakov24lev99@mail.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Zykova, Elena**

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

### **Zykov, Sergey**

Researcher

### **Iglovsky, Stanislav**

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher

### **Yakovlev, Evgeny**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory