

ПРЕПРИНТ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
Дубна

P18-2019-61

А. С. Кабылова\*, Н. М. Омарова\*, О. Чалигава,  
Н. С. Юшин, М. В. Фронтасьева

МХИ КАК БИОИНДИКАТОРЫ ВОЗДУШНЫХ  
ЗАГРЯЗНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ  
И ДРУГИМИ ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАЗАХСТАНЕ

Направлено в Российскую академию естествознания  
для Студенческого научного форума-2020,  
в научный журнал Академии естествознания (импакт-фактор РИНЦ)

---

\*Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Нур-Султан

Кабылова А. и др.

P18-2019-61

Мхи как биоиндикаторы воздушных загрязнений тяжелыми металлами и другими токсичными элементами в Центральном Казахстане

Инструментальный нейтронный активационный анализ в сочетании с методом мхов-биомониторов использован для оценки степени загрязнения атмосферы в центральной части Казахстана (Карагандинская область). В образцах мхов определены концентрации 39 макро-, микро- и следовых элементов. На основании аналитических результатов с помощью ГИС-технологий построены карты пространственного распределения тяжелых металлов и других токсичных элементов на исследуемой территории.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2019

Kabylova A. et al.

P18-2019-61

Mosses as Bioindicators of Air Pollution by Heavy Metals and Other Toxic Elements in Central Kazakhstan

Instrumental neutron activation analysis in combination with the moss-biomonitoring technique was used for assessment of air pollution in the Central Kazakhstan. Contents of 39 major and trace elements were determined in the moss samples. GIS technologies were used to construct distributions maps of heavy metals and other toxic elements over the investigated territory.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха является одной из основных проблем, стоящих перед человеком на протяжении нескольких десятилетий. Среди многочисленных веществ, поступающих в атмосферу в результате антропогенных действий, особое внимание уделяется тяжелым металлам (ТМ). Возрастающее накопление тяжелых металлов может приводить к нарушению экологического баланса, а также ТМ могут вызвать серьезные заболевания у человека. В настоящее время для биомониторинга атмосферного воздуха активно развивается метод мхов-биомониторов. В конце 1980-х гг. была основана Международная кооперативная программа по изучению воздействия загрязнений воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры (ICP Vegetation, формально ICP Crops). В ICP Vegetation принимают участие ученые 40 стран (Harmens et al., 2013). Программа координируется Центром экологии и гидрологии (Centre for Ecology and Hydrology (СЕН)) в Бангоре (Великобритания) [1]. В 2014 г. координация европейским одновременным сбором мхов перешла к Объединенному институту ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) [2]. В Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ) на протяжении многих лет ведутся работы по изучению загрязнения воздуха тяжелыми металлами с помощью нейтронного активационного анализа (Frontasyeva et al., 2016) [3]. С 2015 г. Казахстан участвует в программе Комиссии ООН по дальнему трансграничному переносу воздушных загрязнений в Европе (UNECE LRTAP) с использованием метода мхов-биомониторов. В настоящей работе впервые представлены результаты исследований воздушных загрязнений тяжелыми металлами на территории Центрального Казахстана (Карагандинская область).

Все города Карагандинской области являются населенными пунктами с сильно нарушенной экологией. В Центральном Казахстане к промышленным городам относятся Караганда, Темиртау, Жезказган, Балхаш и др. В Караганде находится угольный бассейн, который является поставщиком коксующегося угля. Город Темиртау — крупный промышленный центр. Большое количество производств принадлежит металлургическому заводу «Arcelor Mittal Temirtau». Комбинат расположен близко к жилым кварталам города. Металлургический комбинат «Arcelor Mittal Temirtau» почти каждый год выбрасывает 340 тыс. т отходов. В городе Балхаш расположен Балхашский горно-металлургический комбинат «Балхашцветмет», который оказывает сильнейшее загрязняющее действие. Комбинат «Балхашцветмет» является основным загрязнителем г. Балхаш. «Балхашцветмет» загрязняет окружающую среду тяжелыми металлами и диоксидом серы. В области также находится Карагайлинский горно-обогатительный комбинат — подразделение ТОО корпорации «Казахмыс», занимающееся переработкой руды. Комбинат находится в поселке Карагайлы в Каркаралинском районе. В процессе производства образуются следующие опасные вещества: медь, цинк, свинец и др. В составе руд содержатся пыли тяжелых металлов, выделяющиеся в атмосферу с другими видами неорганической пыли. В основном выделяется пыль кремнезема. При переработке и транспортировке руды между производственными участками выделяются вредные вещества. Рудник «Кентобе», который находится в 120 км от поселка Карагайлы, занимается добычей железной руды открытым способом и ее переработкой. При переработке и транспортировке руды между производственными участками выделяются вредные вещества. В г. Жезказган основным источником загрязнений является один из мощнейших медных комбинатов «Жезказганцветмет». В городе разрабатываются месторождения меди, примесей редкоземельных элементов и благородных металлов, таких

как золото, серебро, висмут, цинк, молибден, кадмий, рублий, цезий, литий, таллий, кобальт и др. В процессе дальнейшего развития производительных сил антропогенная нагрузка на окружающую среду может удваиваться каждые 10–15 лет [4].

Территория Карагандинской области относится к континентальной Западно-Сибирской степной зоне. Карагандинская область граничит на севере с Акмолинской и Павлодарской, северо-западе — Кустанайской, востоке — Восточно-Казахстанской, на юге — Жамбылской и Южно-Казахстанской, на юго-западе — Кызылординской областями. Площадь региона составляет 428 тыс км<sup>2</sup>. Его протяженность с севера на юг 1300 км, с востока на запад 700 км.

Отрицательная сторона географического положения области — удаленность от четырех океанов. Поэтому здесь климат засушливый и мало осадков, для республики и Карагандинской области характерен материковый климат, который имеет большую контрастность, резкие сезонные колебания.

Климат Центрального Казахстана резко-континентальный. Летом здесь очень жарко и сухо, зима суровая, очень ветреная. Территория фактически целый год находится при высоком давлении. Зимой здесь проходит Сибирский антициклон, а летом антициклон сменяется восточным отрогом Азорского максимума. В Центральном Казахстане по этим причинам погода зимой морозная, а летом жаркая. На территорию поступают арктические, полярные и тропические воздушные массы. С поступлением арктических воздушных масс температура понижается до 30–40 °С. В теплое время территория — под действием туранского и иранского тропического воздуха. В этот период в области бывает высокая температура, большая сухость воздуха.

Солнечные сияния здесь продолжаются 2300–2400 ч/год. Максимум таких дней приходится на июль. Вегетационный период в Карагандинской области бывает 180–210 дней. В это время солнечного тепла поступает столько, сколько и в южных регионах страны. С недостатком влаги в области даже в июле температура может понизиться до 10–15 °С тепла. Поздневесенние и раннеосенние заморозки сокращают безморозные дни до 130–140.

Зимой наблюдается облачность, вероятность пасмурных дней 35–60 %.

Средняя температура здесь бывает от +2 до +6 °С. В январе, самом холодном месяце, средняя температура воздуха –(16–17) °С. Абсолютный минимум температур –(42–45) °С. Весной температура воздуха переходит через 0 °С в сторону положительных температур 7–8 апреля, потом +5 °С — 21–23 апреля.

Июль считается самым теплым месяцем года. В июле средняя температура +(20–25) °С. Максимум температуры в этом месяце достигает +(37–40) °С.

В связи с проникновением континентального тропического воздуха из Южного Казахстана, Средней Азии и Ирана лето в области очень жаркое и сухое.

С 22–25 октября наблюдается переход температур через 0 °С. Осенние заморозки начинаются в конце сентября. В конце октября и в начале ноября начинает образовываться снежный покров. Осенью суше, чем летом.

Амплитуда колебаний среднемесячных температур составляет 34–39 °С. Абсолютная амплитуда бывает 80–90 °С. Среднее количество осадков в год в Карагандинской области — 300–400 мм.

В июне и июле выпадает наибольшее количество осадков: 41–57 мм.

В феврале–марте и ноябре–декабре выпадает меньшее количество осадков. Зимой выпадает 35–37 % осадков в виде снега. Каждый год количество осадков разное. Во влажные годы количество осадков до 400–450 мм, а в сухие 90–170 мм. Это фактически сухой, засушливый климат почти без осадков. Иногда осадков не бывает 1,5–2 месяца. Здесь август–сентябрь, а иногда июль бывают без дождя.

Центральный Казахстан недостаточно увлажнен, это проявляется в малом количестве атмосферных осадков и низкой влажности воздуха.

Территория находится в незащищенном от проникновения воздушных масс месте, что может быть причиной ветровой деятельности.

Средняя годовая скорость ветра составляет 3,5–5,5 м/с. Зимой на 20–25 % территории приходят юго-западные ветры. Бывают ветры северных направлений. Чаше ветры со скоростью 25–30 м/с наблюдаются зимой и весной.

По сравнению с другими степными полупустынными зонами эта получает больше солнечной радиации, и от этого количество осадков меньше. В летнее время температура повышается и увеличивается испаряемость. После этого появляется недостаток влаги.

Климат здесь континентальный. Зима очень суровая. Средняя температура в январе достигает  $-16^{\circ}\text{C}$ , иногда  $-40^{\circ}\text{C}$ . Лето жаркое, средняя температура в июле  $23-26^{\circ}\text{C}$  на западе,  $18-23^{\circ}\text{C}$  на востоке. Количество осадков 200–225 мм, в отдельных районах 250–275 мм. Максимум осадков приходится на май. Жаркое и сухое лето оказывает влияние на выветривания, на почвенный покров и растения. Резко-континентальный климат характеризуется резкими перепадами температур по годам и по сезонам. Здесь по климатическим причинам малое количество осадков и активный ветер [4].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Пробоотбор.** В октябре 2018 г. были собраны 38 образцов мхов на территории Центрального Казахстана, где находятся 35 крупных горнодобывающих и перерабатывающих предприятий (рис. 1, 2) [4]. Были собраны 6 видов мхов: *Hypnum cupressiforme*, *Brachythecium salebrosum*, *Abietinella abietina*, *Homalothecium sericeum*, *Homalothecium philippeanum*, и *Homalia trichomanoides* (рис. 3). Пробоотбор осуществлялся в соответствии с программой ООН [<https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey>].

**Анализ. НАА.** *Нейтронный активационный анализ (НАА)* — это ядерный процесс, используемый для определения концентраций элементов в образце. Круг элементов, определяемых на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ для растительности, включает в себя Ag, Al, As, Au, B, Br, Ca, Cd, Ce, Cl, Cr, Cs, Cu, Dy, Eu, Fe, Ga, Hf, Hg, I, Ir, K, Li, Mg, Mn, Zn, Mo, Na, Ni, Rb, Sb, Se, Sn, Ta, Te, Th, W, V, U. При этом погрешность анализа



Рис. 1. Основная карта точек пробоотбора в Карагандинской области



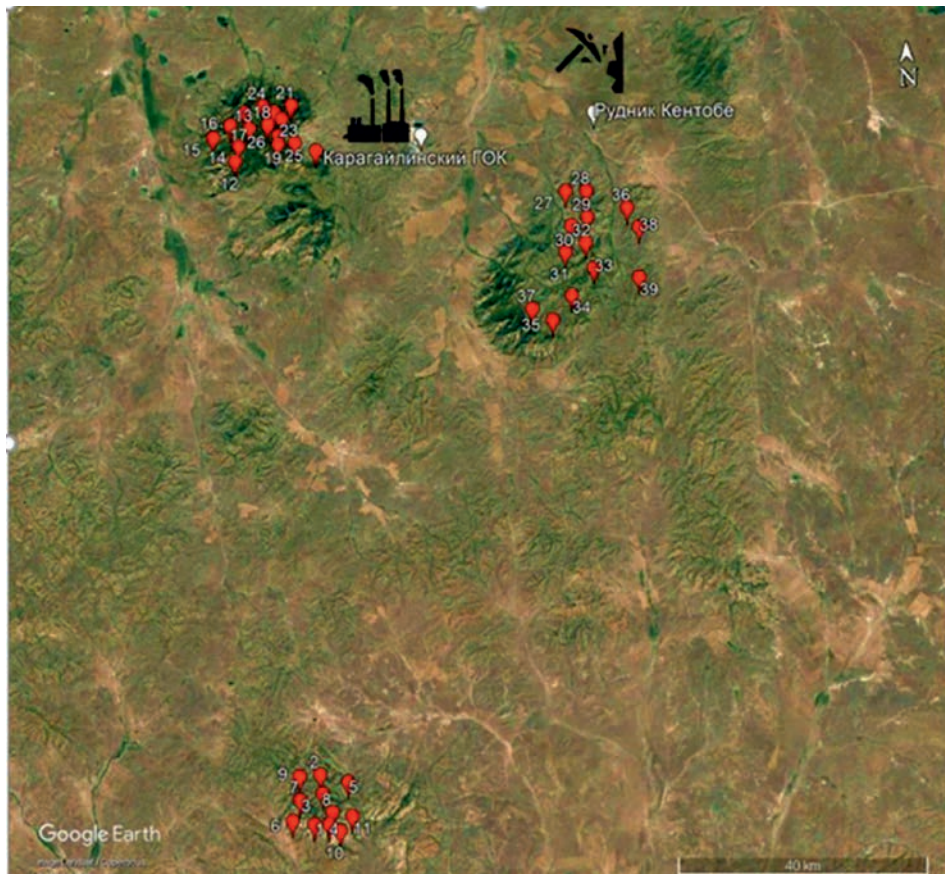


Рис. 2. Карта точек пробоотбора в Карагандинской области

в большинстве практических случаев составляет от 1 до 10 %, а предел обнаружения — от сотен нанограмм до единиц пикограмм [11].

**Пробоподготовка для нейтронно-активационного анализа.** Подготовку образцов к облучению проводили в химической лаборатории СНААПИ. Образцы мхов не измельчали, сушили при комнатной температуре до постоянного веса (Steinnes et al., 1994)

Для определения элементов по короткоживущим изотопам образцы мхов по  $\sim 0,3$  г упаковывали в полиэтиленовые пакетики и по долгоживущим — в алюминиевые чашки (рис. 4) [12].

**Процесс облучения на реакторе ИБР-2.** Инструментальный нейтронный активационный анализ проводили на импульсном реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ в Дубне с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА.

Контейнеры с образцами для определения долгоживущих радионуклидов облучали 4–5 дней в канале с кадмиевым экраном. После облучения образцы переупаковывали: особо чистые в полиэтиленовые контейнеры для измерения наведенной  $\gamma$ -активности. Наведенную  $\gamma$ -активность образцов измеряли дважды спустя 4–5 дней (As, Br, K, La, Na, Mo, Sm, U и W) и 20 дней (Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Ni, Rb, Sb, Sc, Sr, Ta, Tb, Th, Yb и Zn). Время измерения составляло 40–50 мин и 2,5–3 ч соответственно. Для определения короткоживущих изотопов образцы мхов, упакованные в полиэтиленовые контейнеры, облучали в течение 3–5 мин. После 5–7 мин наведенную  $\gamma$ -активность измеряли дважды в течение 3–5 мин и 10–15 мин последовательно. Измерение наведенной  $\gamma$ -активности проводилось с помощью Ge(Li)-детекторов. Разрешение детектора принято характеризовать разрешением на  $\gamma$ -линиях (1332 кэВ) и (122 кэВ). Разрешение детекторов, используемых на РЕГАТА, составляет 2,5–3 кэВ [13]. Для обработки гамма-спектров использовался пакет программы GENIE 2000, включающий процедуру обработки гамма-спектра (автоматический поиск пиков, идентификацию радиоактивных



*Hypnum cupressiforme* [5]



*Brachythecium salebrosum* [6]



*Abietinella abietina* [7]



*Homalothecium sericeum* [8]



*Homalothecium philippeanum* [9]



*Homalia trichomanoides* [10]

Рис. 3. Виды мхов, использованные в исследовании

изотопов и определение концентраций элементов, содержащихся в исследуемой пробе), разработанный в ЛНФ ОИЯИ [14, 15].

**ААС.** *Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС)* — распространенный в аналитической химии инструментальный метод количественного элементного анализа (современные методики атомно-абсорбционного определения позволяют определить содержание почти 70 элементов Периодической системы) по атомным спектрам поглощения (абсорбции) для определения содержания металлов в растворах их солей. ААС отличается высокой избирательностью, чувствительностью, экспрессностью. Развитие данного метода анализа, его совершенствование и широкое признание во всей сфере анализа принципиально расширило возможности аналитической химии. Например, во многих случаях для определения следов металлов использование ААС привело к значительному





Рис. 4. Упакованные образцы мхов для НАА

вытеснению такого широко известного метода, как спектрофотометрия, уступающего атомной абсорбции по селективности, трудоемкости и чувствительности. По производительности работы и скорости выполнения анализов больших партий однотипных проб пламенная абсорбция превосходит такие классические химические методы, как гравиметрический, титриметрический, спектрофотометрический, электрохимический и др. При определении ультрамалых концентраций отдельных элементов электротермическая атомная абсорбция успешно конкурирует со многими инструментальными методами анализа. На данный момент ААС позволяют определить около 70 элементов — металлов и неметаллов. Для большинства определяемых элементов возможно достижение относительно низких пределов обнаружения: в пламенном варианте — от десятых долей до десятков и сотен мкг/л; в электротермическом варианте — от тысячных до десятых долей мкг/л. Абсолютные пределы обнаружения в пламени составляют  $10^{-1}$ – $10^5$  нг, в электротермическом варианте  $10^5$ – $10$  нг. Также преимуществом ААС является его универсальность в отношении самых разнообразных объектов анализа и возможность применения его как для определения следов, так и надежного и точного определения основных компонентов в образцах сложных составов [16].

**Пробоподготовка для атомно-абсорбционного анализа.** Для атомно-абсорбционного анализа брали 0,3 г образцов мхов и помещали в тефлоновые сосуды. Далее в сосуды с образцами добавляли 5 мл азотной кислоты и 2 мл перекиси водорода. Для полного разложения сосуды помещали в микроволновую систему (Mars-6 — микроволновая система разложения проб, СЕМ (США)). Разложение проб осуществляли в два этапа: на первом этапе — при температуре  $160^{\circ}\text{C}$ , давлении 20 бар, мощности 400 В и времени 15 мин; на втором этапе температура, давление, мощность оставались неизменными при времени 10 мин. После охлаждения до комнатной температуры образцы переносили в 10-мл колбы и доводили до метки с бидистиллированной водой.

С помощью атомно-абсорбционного спектрометра iCE 3300 с электротермической (графитовая кювета) атомизацией (Thermo Fisher Scientific, США) определяли наличие Cd, Cu, и Pb.

**Контроль качества.** Калибровочные растворы для атомной абсорбции готовили из стандартного раствора 1 г/л (AAS standard solution; Merck, DE). Для калибровки нейтронно-активационного анализа использовались следующие сертифицированные стандарты Национального института стандартов и технологий (NIST, Gaithersburg, MD, USA): 1632c (NIST), 1633b (NIST), 1547 (NIST), 1549 (NIST), 1633c (NIST), 2709 (NIST) и SL-1 (IAEA).

**Построение карты.** С помощью программного обеспечения ArcGIS были построены карты распределения концентраций тяжелых металлов.



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В целом 39 элементов (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, **Cu**, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, **Cd**, Sb, I, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Tm, Hf, Ta, W, Au, **Pb**, Th и U) были определены с помощью нейтронного активационного анализа и атомной абсорбционной спектрометрии (отмечены жирным шрифтом). Значения медианы и диапазоны концентраций для исследуемых элементов представлены в таблице. При

**Среднее, медиана, минимум, максимум значений концентрации 39 элементов, полученных с помощью НАА (36 элементов) и ААС (Cu, Cd, и Pb) (мг/кг)**

Элемент	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум
Na	605,08	441,5	187	2060
Mg	2385,8	1835	1180	5850
Al	3227,8	2435	967	11600
Cl	412,1	124	56	2290
K	7003,4	5740	3330	18200
Ca	8010,5	6890	3970	15700
Sc	0,7	0,49	0,103	5
Ti	147,8	121,5	39	525
V	4,2	3,1	0,8	18
Cr	6,3	5,4	3,2	15,2
Mn	187,7	154	53	584
Fe	1732,1	1395	501	5050
Co	0,7	0,615	0,326	1,47
Ni	2,9	2,45	1,1	6,2
Zn	61,1	49	16,5	179
As	1,2	1,1	0,21	3,16
Br	9,4	5,45	1,5	48
Rb	12,8	10,05	4,95	38
Sr	39,1	31,25	18	93
Zr	11,8	7,95	2,3	55
Sb	0,2	0,198	0,042	0,78
I	2,7	1,615	0,63	30
Cs	1,1	0,313	0,083	12,2
Ba	124,0	114	10,7	305
Sb	0,2	0,198	0,042	0,78
I	2,7	1,615	0,63	30
Cs	1,1	0,313	0,083	12,2
Ba	124,0	114	10,7	305
La	5,5	2,25	0,74	55
Ce	5,8	3,655	0,96	27,6
Nd	6,0	2,5	0,15	49
Sm	1,4	0,45	0,115	12
Tb	0,4	0,076	0,02	3,46
Tm	0,4	0,060	0,005	4,500
Hf	0,2	0,15	0,07	0,88
Ta	0,1	0,033	0,010	0,287
W	0,5	0,315	0,083	3
Au	0,0	0,004	0,001	0,026
Th	0,9	0,4275	0,19	12
U	4,5	0,14	0,063	67
Cu	10,7	9,27	5,43	21,88
Cd	0,2	0,21	0,03	0,52
Pb	6,9	6,95	1,47	16,71

исследовании содержания тяжелых металлов на территориях вблизи Карагайлинского горно-обогатительного комбината и рудника Кентобе в образцах мхов было обнаружено превышение содержания меди, цинка, марганца, железа, вольфрама и свинца. На руднике Кентобе железная руда добывается открытым способом, в состав исходной руды входят тяжелые металлы, которые при транспортировке и переработке руды выделяются в атмосферу в виде неорганической пыли. В образцах мхов, собранных на расстоянии 100 км от медеплавильного комбината, наблюдаются наибольшие концентрации цинка и меди. Высокие значения концентрации свинца наблюдаются в точках вблизи Балхашского горно-металлургического комбината и Карагайлинского горно-обогатительного комбината. Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне загрязненности медью, цинком, свинцом и другими токсичными элементами. Сравнение полученных результатов с аналогичными данными европейских стран (рис. 5–10) показало отно-

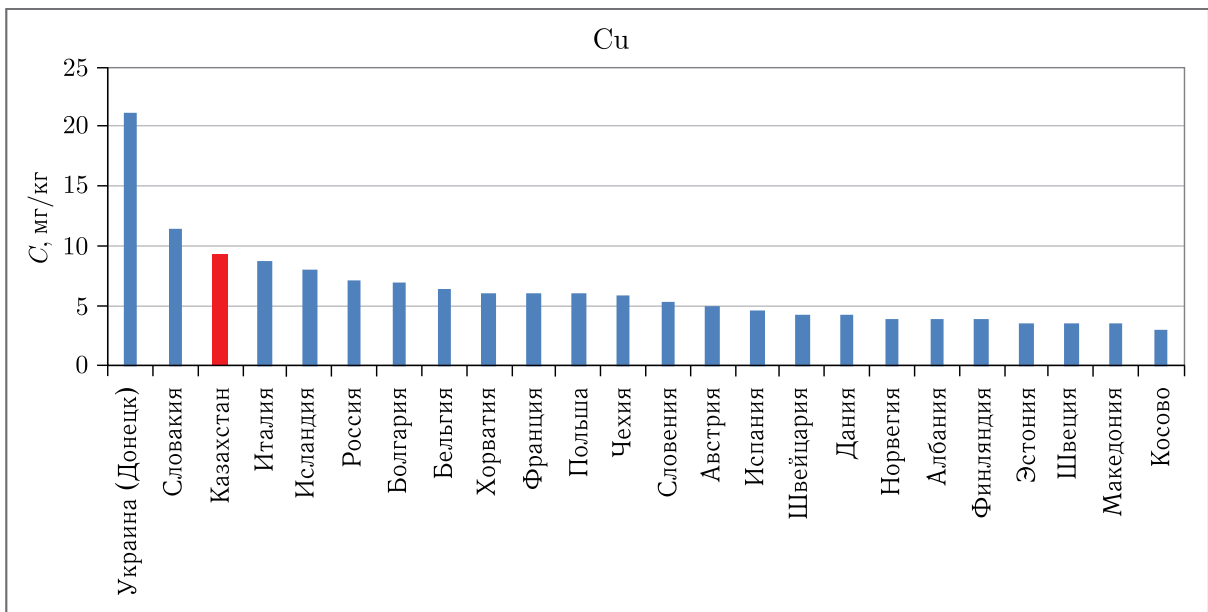


Рис. 5. Сравнение концентрации меди для некоторых стран Европы и Казахстана

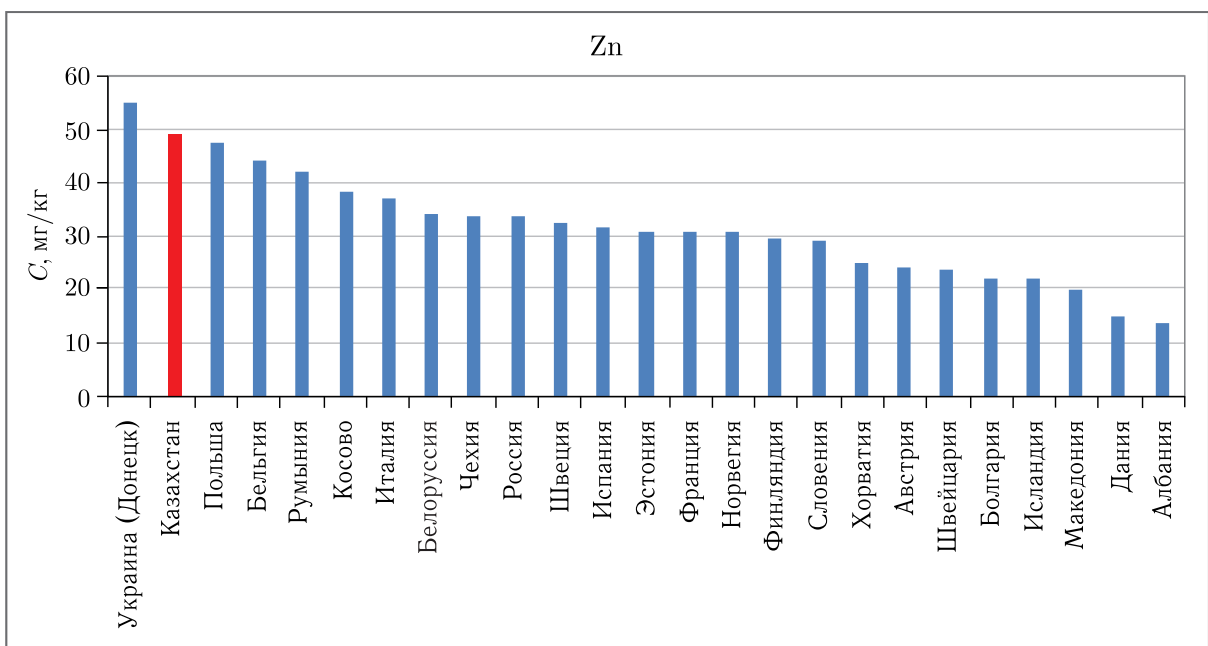


Рис. 6. Сравнение концентрации цинка для некоторых стран Европы и Казахстана

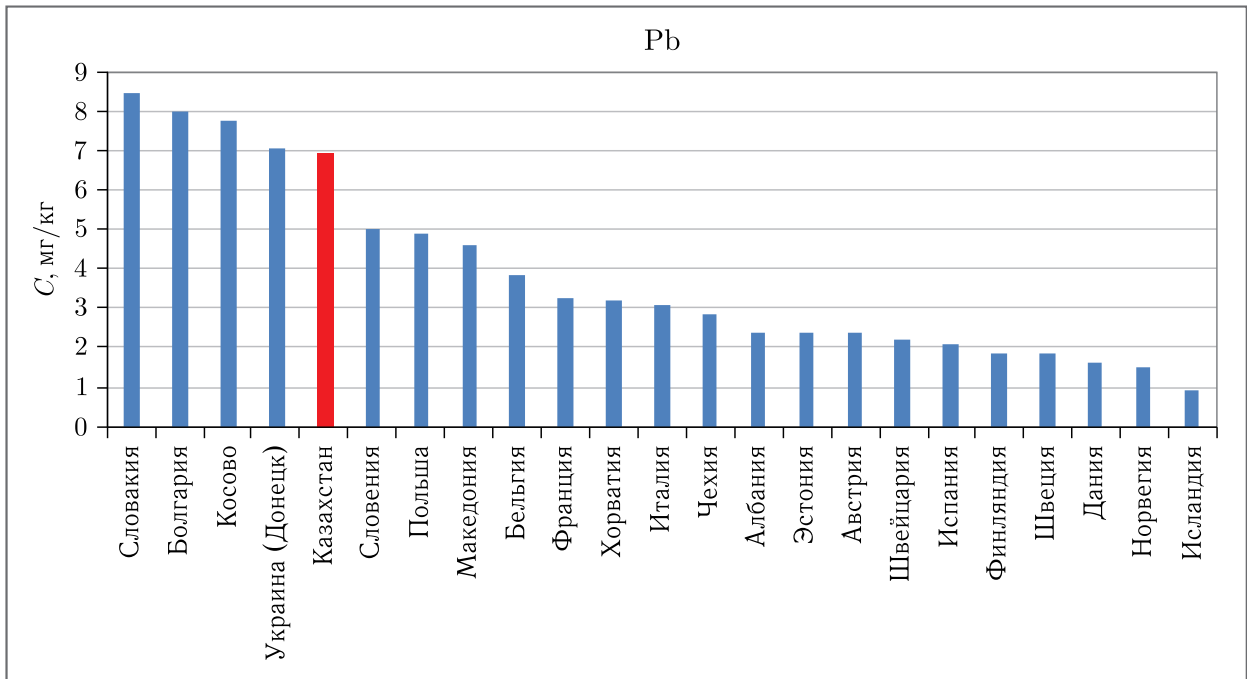


Рис. 7. Сравнение концентрации свинца для некоторых стран Европы и Казахстана

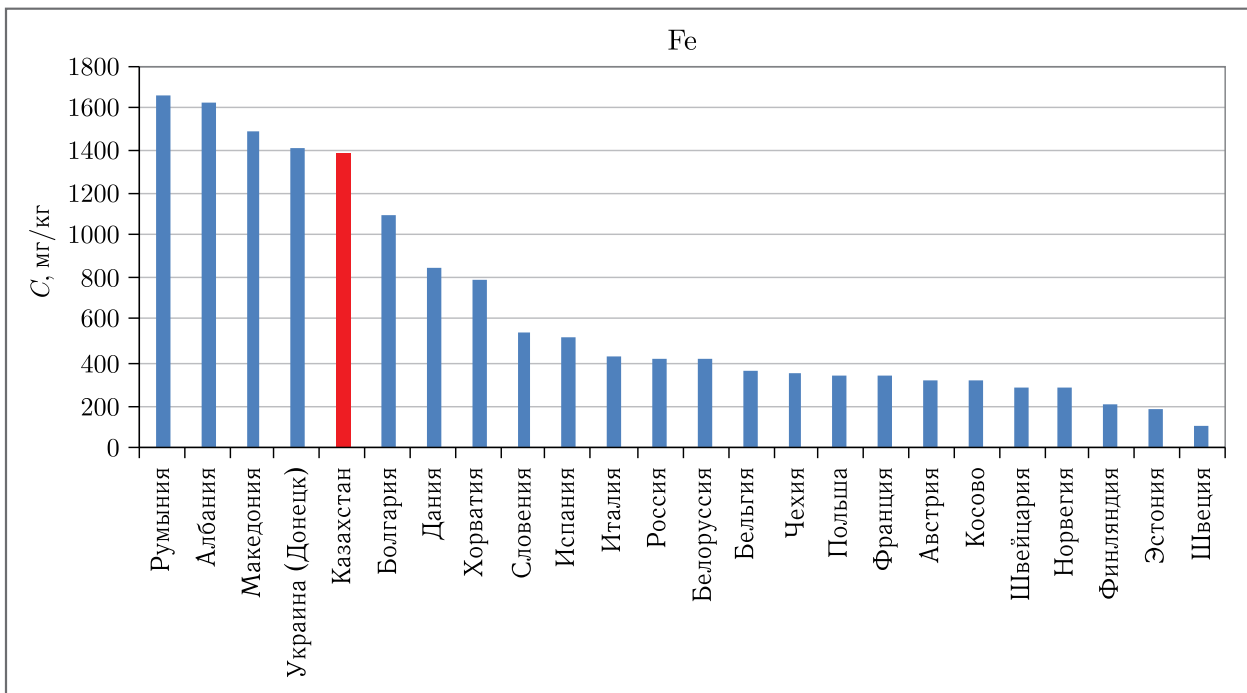


Рис. 8. Сравнение концентрации железа для некоторых стран Европы и Казахстана

сительно высокие уровни загрязнения тяжелыми металлами, такими как: Cu, Zn, Pb, Fe, и V. (<https://icpvegetation.ceh.ac.uk/sites/default/files/2010>)

По результатам анализа были построены карты распределения с помощью программного обеспечения ArcGIS для некоторых тяжелых элементов: Cu, Zn, V, Fe, Pb и W (рис. 11–16).

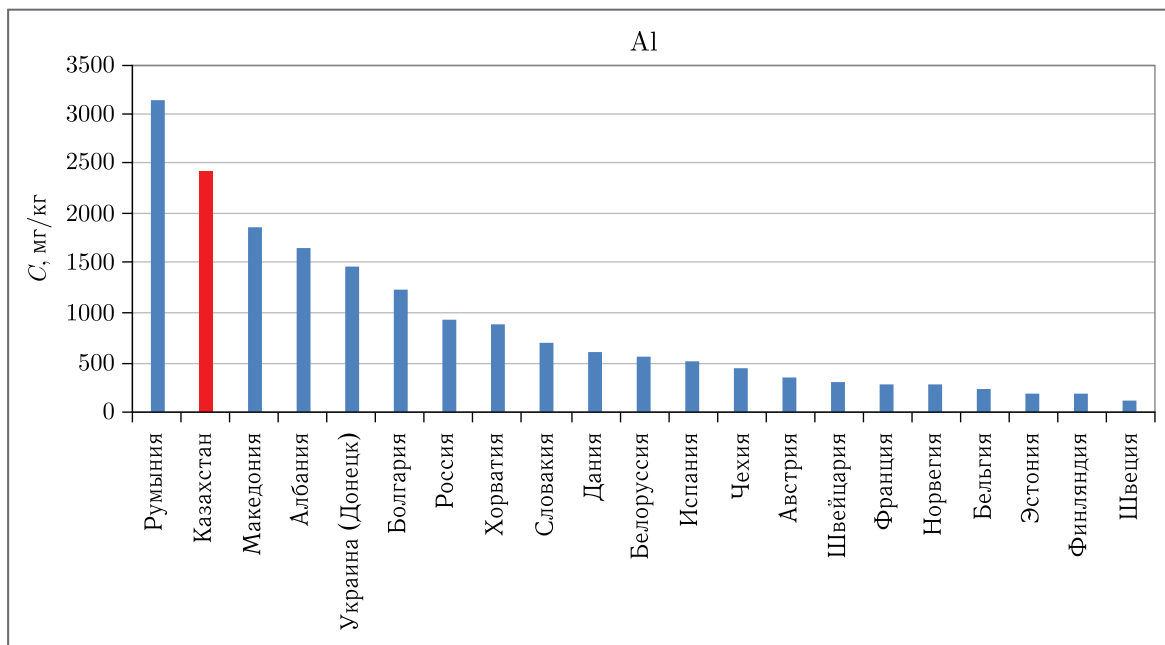


Рис. 9. Сравнение концентрации алюминия для некоторых стран Европы и Казахстана

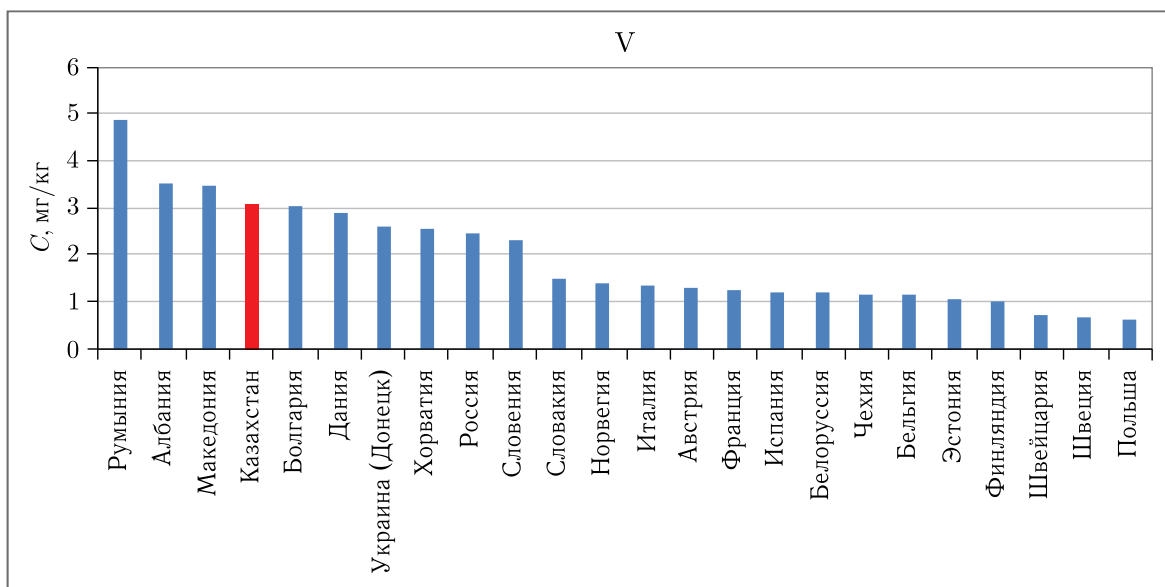


Рис. 10. Сравнение концентрации ванадия для некоторых стран Европы и Казахстана

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на основе анализа 38 образцов мхов-биоиндикаторов, собранных в центральной части Казахстана, методом нейтронного активационного анализа и атомной абсорбционной спектрометрии впервые определено содержание 39 элементов, включая тяжелые металлы, редкоземельные элементы, уран и торий. Составлены карты пространственного распределения элементов на изучаемой территории. Проведенные исследования показывают значительную загрязненность ТМ окружающей среды промышленных регионов Карагандинской области. Основными загрязняющими элементами являются медь, цинк, железо, марганец и свинец. Высокие концентрации этих элементов представляют наибольшую опасность для здоровья человека. Это указывает на необходимость изучения миграции тяжелых металлов и регулярного проведения биомониторинга атмосферного воздуха.



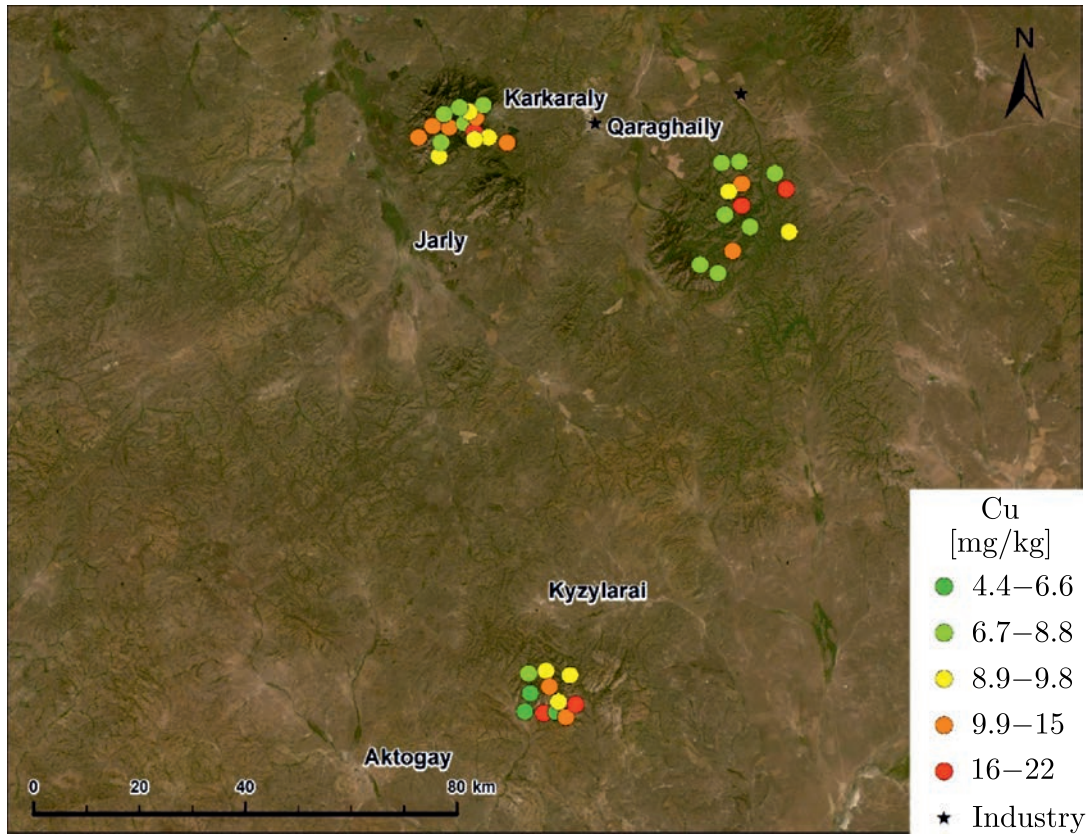


Рис. 11. Карта распределения концентрации меди, мг/кг

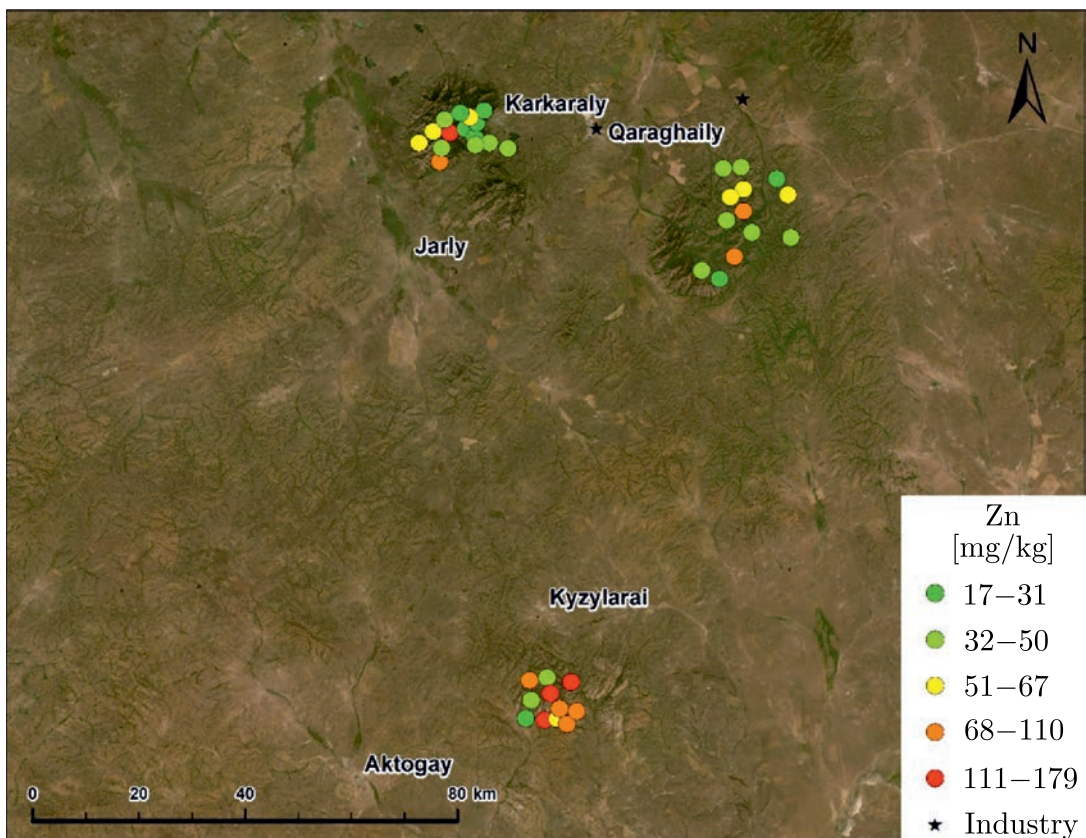


Рис. 12. Карта распределения концентрации цинка, мг/кг



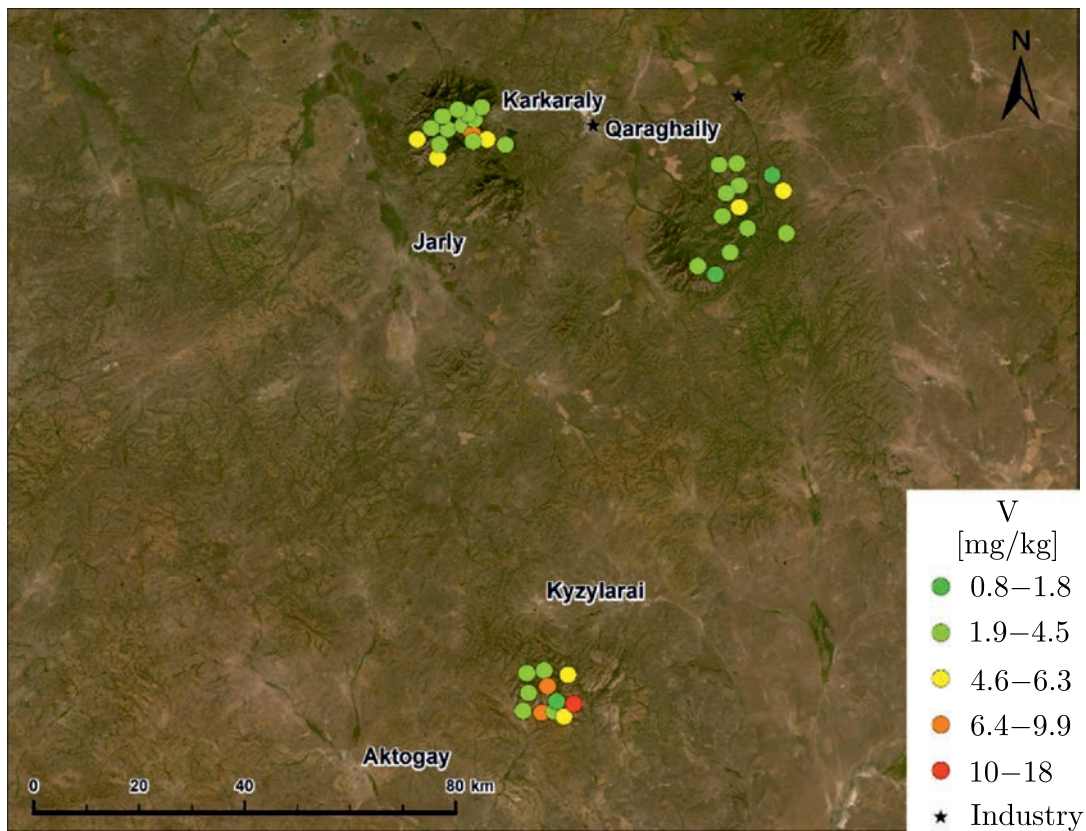


Рис. 13. Карта распределения концентрации ванадия, мг/кг

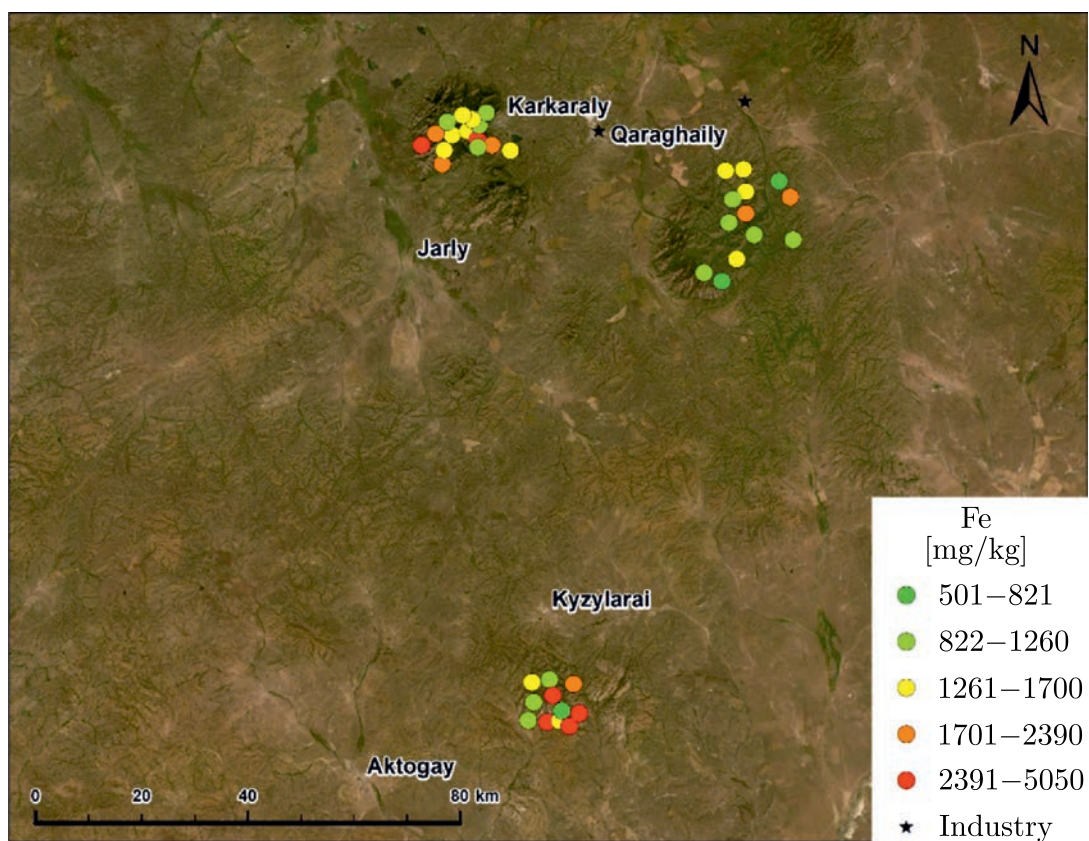


Рис. 14. Карта распределения концентрации железа, мг/кг



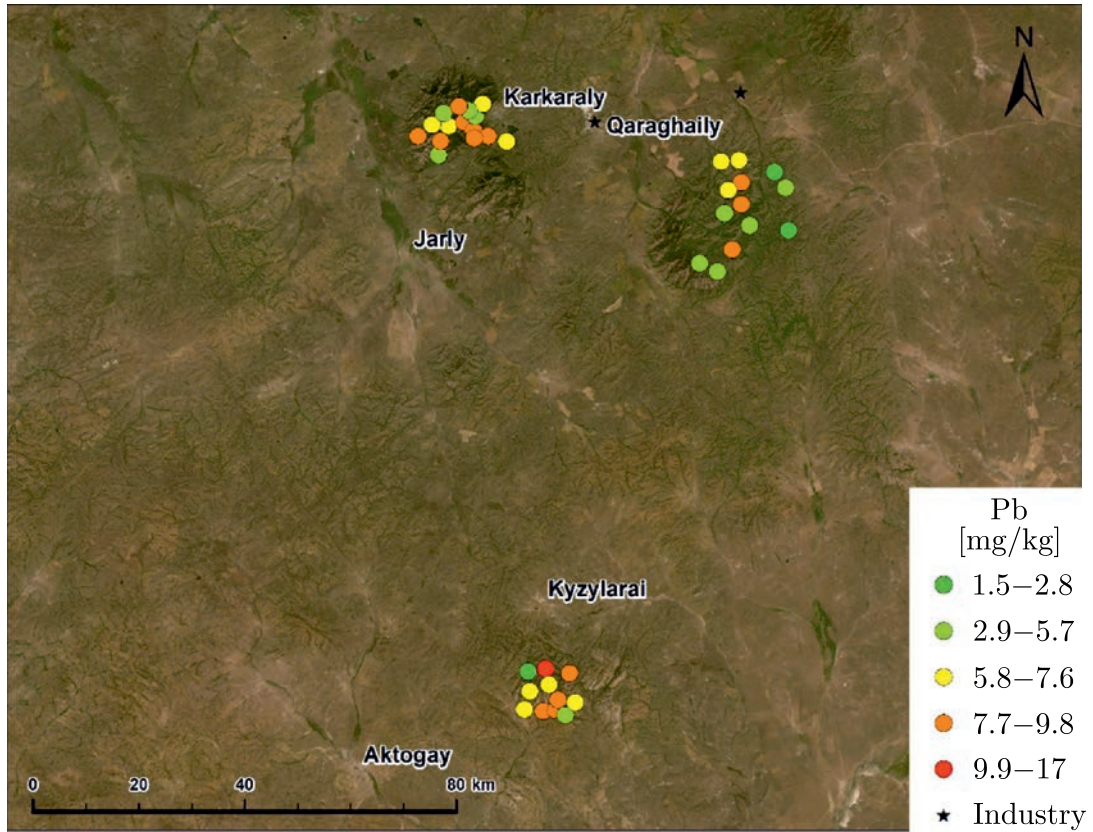


Рис. 15. Карта распределения концентрации свинца, мг/кг

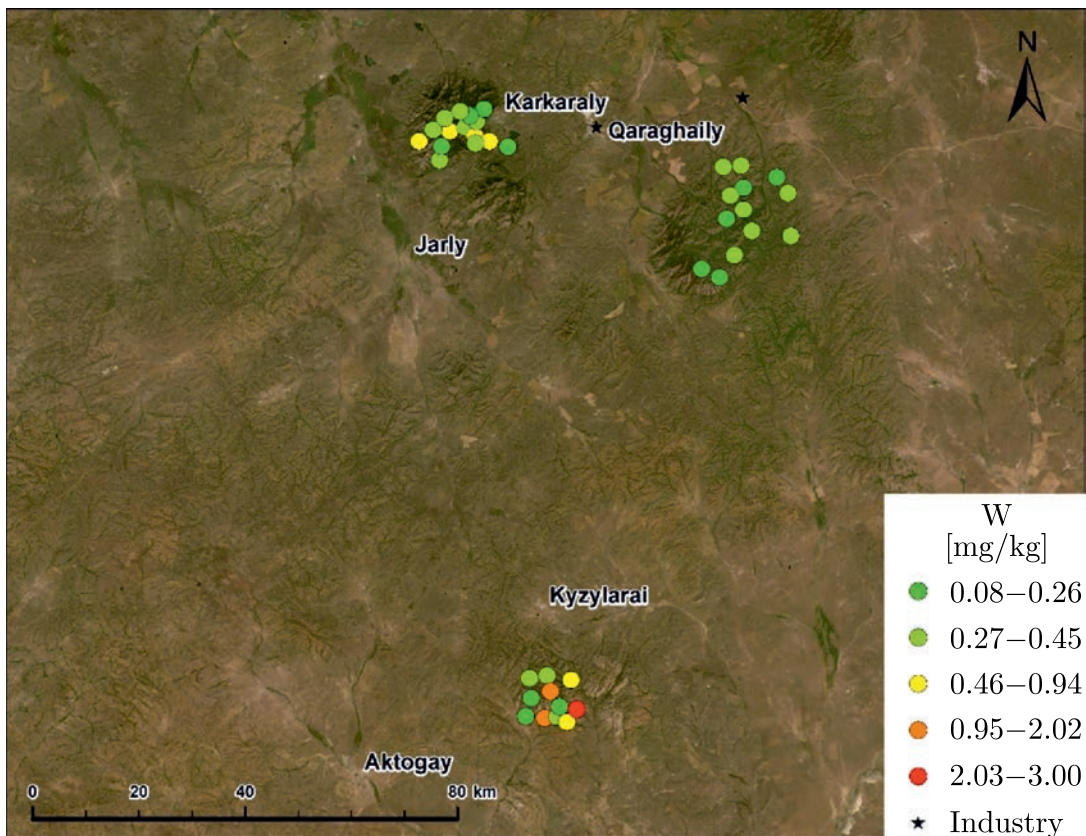


Рис. 16. Карта распределения концентрации вольфрама, мг/кг

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Harmens H., Mills G., Norris D.* Heavy Metals and Nitrogen in Mosses: Spatial Patterns in 2010/2011 and Long-Term Temporal Trends in Europe. Bangor, UK, NERC/Centre for Ecology & Hydrology. 2013. <http://nora.nerc.ac.uk/502676/1/N502676CR.pdf>. Accessed 26 June 2016
2. <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/>
3. *Frontasyeva M. V., Harmens H., Steinnes E.* Monitoring Long-Term and Large-Scale Deposition of Air Pollutants Based on Moss Analysis // *Biomonitoring of Air Pollution Using Mosses and Lichens: Passive and Active Approach — State of the Art and Perspectives* / Eds. M. Aničić Urošević, G. Vuković, M. Tomašević. New York: Nova Sci. Publ., 2016.
4. *Конкабаева А. Е., Ишмуратова М. Ю.* Оценка накопления тяжелых металлов в почве, воде и растениях промышленных регионов Карагандинской области. Казахстан, Караганда, 2016. С. 28–43.
5. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Hypnum\\_cupressiforme\\_habitus.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Hypnum_cupressiforme_habitus.jpg)
6. <https://sites.cortland.edu/bryophytes/wpcontent/uploads/sites/14/2016/07/B.-salebrosum-AH-314.jpg>
7. [http://www.cisfbr.org.uk/images/Abietinella\\_abietina-abie\\_013.JPG](http://www.cisfbr.org.uk/images/Abietinella_abietina-abie_013.JPG)
8. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homalothecium\\_philippeanum\\_\(c,\\_144703-474753\)\\_2097.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homalothecium_philippeanum_(c,_144703-474753)_2097.JPG)
9. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homalothecium\\_philippeanum\\_\(c,\\_144703-474753\)\\_2097.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Homalothecium_philippeanum_(c,_144703-474753)_2097.JPG)
10. [http://s3.amazonaws.com/shrimpspotmedia/monthly\\_2018\\_02/DSCN5149.JPG.92a5761a8455df367f442296d3879f53.JPG](http://s3.amazonaws.com/shrimpspotmedia/monthly_2018_02/DSCN5149.JPG.92a5761a8455df367f442296d3879f53.JPG)
11. *Фронтасьева М. В.* Нейтронный активационный анализ в науках о жизни // ЭЧАЯ. 2011. Т. 42, № 2. С. 636–716.
12. *Steinnes E., Hanssen J.E., Ramaek J.P., Vogt N.B.* Atmospheric Deposition of Trace Elements in Norway: Temporal and Spatial Trends Studied by Moss Analysis // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1994. V. 74(1). P. 121.
13. *Frontasyeva M. V., Pavlov S. S.* REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies // *Problems of Modern Physics* / Eds.: A. N. Sissakian, D. I. Trubetskoy. Dubna: JINR, 1999. P. 152–158.
14. *Ostrovnaya T. M., Nejedjyeva L. S., Nazarov V. M., Borzakov S. B., Strelkova L. P.* Software for INAA on the Basis of Relative and Absolute Methods Using Nuclear Data Base // *Activation Analysis in Environment Protection*. Dubna, 1993. P. 319–326.
15. *Zlokazov V. B.* // *Comp. Phys. Commun.* 1982. V. 28. P. 27; *Злоказов В. Б.* Препринт ОИЯИ P10-82-102. Дубна, 1982.
16. *Чегринцев С. Н.* Атомно-абсорбционный анализ // *Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Физико-химические методы анализа» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 240501 «Химическая технология материалов современной энергетики»*. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014. 44 с.

Получено 24 декабря 2019 г.



Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 13.02.2020.

Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,47. Тираж 215. Заказ № 59883.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6  
E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)