

УДК 504.3.054

ОЦЕНКА ПЫЛЕАЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ЗАВОДА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СНЕГОВОГО ПОКРОВА (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Володина Дарья Анатольевна¹,
volodina.da2014@yandex.ru

Таловская Анна Валерьевна¹,
talovskaj@yandex.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Девятова Анна Юрьевна^{2,3},
devyatovaAY@ipgg.sbras.ru

Еделев Алексей Викторович³,
edelevAV@ipgg.sbras.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность. Загрязнение атмосферного воздуха является важной и актуальной проблемой современности. Одними из главных источников поступления твердых частиц являются предприятия строительной отрасли. Твердые частицы поступают в атмосферный воздух в результате добычи, транспортировки и измельчения сырьевых компонентов, обжига клинкера, помола и транспортировки цемента. В этой связи актуальным является экологическая оценка пылеаэрозольного загрязнения атмосферного воздуха в районах размещения цементных заводов.

Цель: оценить состояние атмосферного воздуха в окрестностях цементного завода г. Искитим на основе изучения пылевой нагрузки, уровней накопления химических элементов и форм их нахождения в составе твердых частиц, осевших в снеговом покрове.

Объекты: твердая фаза снегового покрова, содержащая пылеаэрозольные частицы, осевшие из атмосферного воздуха в снеговой покров в районе расположения цементного завода, сырьевые компоненты для производства цемента (известняк, глина, шлак, пиритные огарки).

Методы: атмогеохимический метод, включающий отбор и подготовку проб снегового покрова для получения твердой фазы снегового покрова; аналитические методы исследования проб: масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, инструментальный нейтронно-активационный анализ, рентгенофазовый метод, сканирующая электронная микроскопия; методы статистической обработки результатов в программном обеспечении «STATISTICA 8»; эколого-геохимический анализ данных путем расчета показателей – пылевая нагрузка (P_n), коэффициент концентрации (K_c), суммарный показатель загрязнения (Z_c), картографическое представление результатов в ПО «Surfer 11» и «CorelDraw X7».

Результаты. Уровни пылевой нагрузки в окрестностях цементного завода находятся в широком диапазоне – от 57 до 1028 мг/(м²·сут.) при среднем значении 318 и фоне 7 мг/(м²·сут.). По нормативным грациям формируются уровни пылевого загрязнения от низкого до очень высокого. По мере удаления от предприятия в север-северо-западном направлении на расстоянии от 0,6 до 2,8 км уровни пылевой нагрузки уменьшаются от 436 до 78 мг/(м²·сут.). Наибольший уровень пылевой нагрузки формируется в ближней зоне влияния (до 500 м) – 1028 мг/(м²·сут.), а также в районе расположения карьера, где добываются основные сырьевые компоненты – 932 мг/(м²·сут.). Минеральный состав твердой фазы снегового покрова представлен минералами сырьевых компонентов – кальцитом (CaCO₃) – 82,1 %, кварцем (SiO₂) – 4,4 %, магнезитом (MgCO₃) – 7,6 %; минералами цементного клинкера – браунмиллеритом (Ca₂(Al, Fe)₂O₅) и хатруритом (Ca₃(SiO₄)O) – 6,4 и 26,6 %, соответственно. В твердой фазе снегового покрова выделены микрочастицы оксидов кальция и железа, а также микрочастицы алюмосиликатного состава с размерами от 2,7 до 64,5 мкм. Техногенная геохимическая специализация твердой фазы снегового покрова характеризуется повышенными уровнями накопления Ca (в 14–23 раза выше фона), Zn, Sr, Sb, Tb, Yb, La, Sm, U (в 2–7 раз выше фона), которые формируют низкий уровень загрязнения. Распределение Ca и пылевой нагрузки по мере удаления от границ завода в северо-западном направлении имеет схожий характер. Максимальные уровни пылевой нагрузки (1028 мг/(м²·сут.)) и накопления Ca (24 %) в твердой фазе снегового покрова определены на расстоянии 0,5 км, а по мере удаления от границ завода (от 0,5 до 2,8 км) наблюдается снижение уровня пылевой нагрузки в среднем от 7 до 13 раз (140–78 мг/(м²·сут.)) и накопления Ca в 1,5 раза (16–17 %). Микроэлементы-индикаторы (Cr, Sb, Zn), которые определены в справочнике наилучших доступных технологий как специфичные в составе выбросов цементного производства, в твердой фазе снегового покрова превышают фоновые уровни от 2 до 7 раз. Для твердой фазы снегового покрова характерными являются геохимические ассоциации Zn-Cr, As-Ta, Yb-U-Sb, Tb-Ba, Th-Na, Fe-La. Отмечаются корреляционные связи между микроэлементами-индикаторами (Ca, Ba, Cr, As, Fe, Sb, Zn), характерными для выбросов производства цемента, с редкоземельными и радиоактивными (U, Th) химическими элементами. Этот факт может указывать на единый источник поступления

этих элементов (при положительных корреляционных связях), а также отражать разницу в составе корректирующих добавок для производства цемента и разные формы нахождения химических элементов в составе твердых частиц в окрестностях цементного завода (при отрицательных корреляционных связях). Выявленные геохимические ассоциации с высокой долей вероятности отражают геохимическую специализацию используемого сырья, корректирующих и минеральных технологических добавок для производства цемента.

Ключевые слова:

пылеаэрозоли, цементная промышленность, пылевая нагрузка, снеговой покров, микроэлементы, загрязнение атмосферного воздуха.

Введение

Одной из актуальных проблем современного мира является загрязнение атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий. Цементная промышленность характеризуется значительным выбросом пыли в атмосферный воздух – на производство 1 т цементного клинкера приходится до 4,7 т газовых выбросов и 0,1 кг пыли [1]. Согласно [2], ежегодно со стороны цементных заводов в атмосферный воздух поступает порядка 2,5 млн т цементной пыли, что составляет 2/3 промышленных выбросов [3]. Оценка уровня загрязнения компонентов окружающей среды в районах расположения предприятий по производству цемента является актуальной как в России [4–7], так и за рубежом [8–16]. Основное внимание уделяется изучению почв и растительности [16–21]. К примеру, в китайском городе Урумчи в пробах почвы, сосновой хвой, коры и кольцах деревьев обнаружены высокие содержания ртути в образцах, отобранных в 0,5 км от цементного завода [22]. Так, в пробах почвы из зоны влияния цементного завода г. Новороссийска выявлены высокие концентрации свинца (Pb), стронция (Sr), серебра (Ag), меди (Cu), цинка (Zn), галлия (Ga), олова (Sn), иттербия (Yb) относительно фона [23]. Немногочисленные работы, в которых преимущественно изучают показатели снеготалой воды, посвящены оценке уровня загрязнения снегового покрова. Например, в районе расположения Теплоозерского цементного завода определили максимальные концентрации взвешенных веществ в снеготалой воде, которые превышают контрольные показатели от 56 до 385 раз на расстоянии 0,2–0,7 км от предприятия [24]. Так, польские ученые из г. Кельце определили, что значения водородного показателя (рН) проб снеготалой воды приближены к щелочной среде и находятся в диапазоне от 6,55 до 9,23 ед., что указывает на влияние предприятий цементной промышленности и добывающих известняк производств на окружающую среду [25].

В Новосибирской области, в г. Искитим, на берегу р. Бердь, функционирует крупный цементный завод, который вносит существенный вклад в развитие отрасли по производству строительных материалов [26]. В 2018 г. в список городов России с самым высоким уровнем загрязнения воздуха вошел г. Искитим [27], что связано с воздействием местных техногенных источников загрязнения на качество атмосферного воздуха. Согласно данным [28], в 2021 г. максимальная разовая концентрация взвешенных веществ составила 1,7 ПДК (наблюдения под факелом цементного завода на расстоянии 1 км), при этом значительного изме-

нения среднегодовых концентраций не произошло. Ранее проведенные исследования снегового покрова в окрестностях цементного завода, расположенного в г. Искитим, показали, что рН снеготалой воды соответствует щелочной среде (9–12 ед.). По результатам изучения снегового покрова также установлено, что твердые частицы в окрестностях данного цементного завода распространяются преимущественно в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях [4–7].

В районах расположения предприятий цементного производства мало изученными остаются вопросы геохимии и минералогии пылеаэрозолей, осевших в снеговой покров. В связи с этим целью данной работы является оценка состояния атмосферного воздуха в окрестностях цементного завода на основе изучения пылевой нагрузки, уровней накопления химических элементов и форм их нахождения в составе твердых частиц, осевших в снеговом покрове в окрестностях цементного завода г. Искитим.

Объект и методы исследования

Отбор проб снегового покрова производился в окрестностях цементного завода, расположенного в г. Искитим Новосибирской области. Выбор пунктов отбора проб обусловлен господствующим направлением ветра (южное, юго-западное), формами рельефа, доступностью отбора проб, удаленностью от дорог. Пробы снегового покрова были отобраны в окрестностях цементного завода, в районе карьера по добыче сырьевых материалов и в жилом районе города Искитим (рис. 1). Расположение точек отбора проб выбрано в соответствии с нормативно-методическими рекомендациями [29, 30] и результатами ранее проведенных исследований [4–7] по распределению твердых частиц в окрестностях данного завода. Всего на исследуемой территории нами отобрано и подготовлено 16 проб снегового покрова.

Пробы отбирались на всю мощность снегового покрова методом шурфа, исключая пятисантиметровый слой над почвой. Рулеткой были зафиксированы площадь шурфа и глубина. Каждая проба была упакована в полиэтиленовый мешок. Вес каждой пробы составлял не менее 15 кг для получения оптимальной массы твердой фазы снегового покрова.

Подготовка проб снегового покрова осуществлялась согласно методическим рекомендациям [29, 30] и многолетнему опыту сотрудников кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ (н.в. отделение геологии) [31–34]. После отбора пробы снегового покрова были растоплены в пластмассовых тарах с получением 10–13 л снеготалой воды. Из данного объема снеготала-

лой воды часть ее (2–3 л с осадком) фильтровалась через беззольный фильтр типа «синяя лента», который потом просушивался вместе с твердой фазой.

Полученная твердая фаза просеивалась через сито с диаметром ячеек 1 мм для освобождения от посторонних примесей и потом взвешивалась.

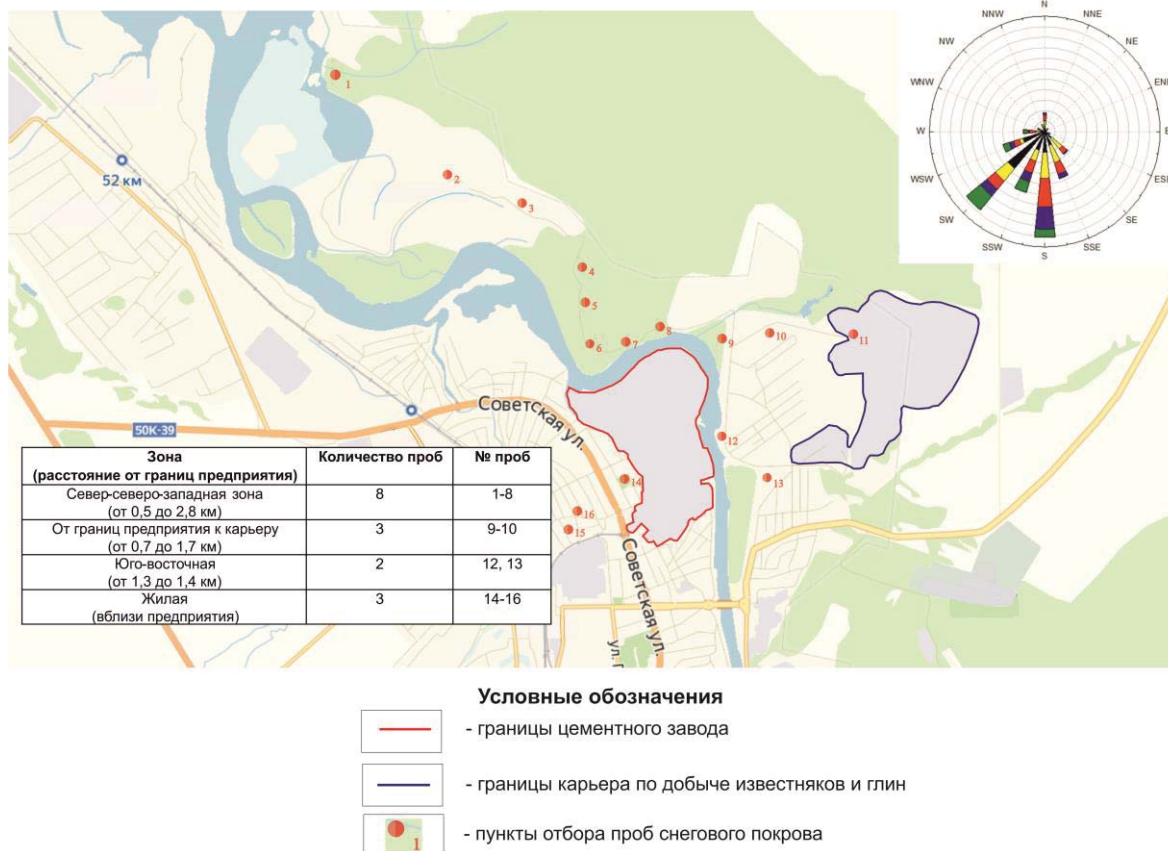


Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов отбора проб снегового покрова в зоне влияния цементного завода г. Искитим (основа карты – Яндекс-карты; зимняя «роза» ветров построена в программе Origin, цветом обозначена скорость ветра)

Fig. 1. Map of snow cover sampling points in the zone of influence of a cement plant in Iskitim, Novosibirsk Region (winter wind rose was created by the author in the Origin program, colors indicate wind speed)

Определение содержания 28 химических элементов (As, Cr, Ba, Sr, Co, Zn, Sb, Hf, Sc, Cs, Rb, Ta, Eu, Sm, Lu, Yb, La, Ce, Tb, Nd, U, Th, Ca, Na, Fe, Au, Ag, Br) в пробах твердой фазы снегового покрова и сырьевых добавок для производства цемента (известняк, глина, шлак, пиритные огарки) производилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории ТПУ на базе ядерного реактора ТПУ. Содержание макроэлементов (Ca, Fe, Na, Mg, Al, Si, P, K, Mn) определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в ХАЦ «Плазма» (г. Томск). Размер и элементный состав микрочастиц определен в лабораториях МИНОЦ «Урановая геология» в ТПУ на электронном сканирующем микроскопе (S 3400N фирмы Hitachi, Япония) с энергодисперсионной приставкой для микроанализа (Bruker XFlash 4010, Германия). Минеральный состав проб изучался методом рентгенофазового анализа на порошковом дифрактометре (фирма Bruker D2 Phaser).

На основании полученных результатов исследований твердой фазы рассчитывались эколого-геохимические

показатели (пылевая нагрузка (P_n), коэффициенты концентрации (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c)) в соответствии с методическими рекомендациями [29, 35, 36].

Пылевую нагрузку (P_n , мг/(м²·сут.)) находили по формуле (1):

$$P_n = \frac{P_0}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где P_0 – масса твердой фазы снегового покрова, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

Фоновый уровень пылевой нагрузки принят в соответствии с ранее выполненными исследованиями [31, 32] – 7 мг/(м²·сут.).

Для выявления уровня содержаний химических элементов относительно фона в твердой фазе снегового покрова рассчитывали коэффициенты концентрации (K_c) по формуле (2):

$$K_c = \frac{C}{C_\phi}, \quad (2)$$

где C – содержание элемента в пробе, мг/кг; C_{ϕ} – фоновое содержание элемента, мг/кг; в качестве фоновых уровней приняты оценки, ранее нами выполненные и опубликованные [37, 38].

По полученным значениям коэффициентов концентрации по формуле (3) определяли суммарный показатель загрязнения (Z_c):

$$Z_c = \sum K_c - (n-1), \quad (3)$$

где K_c – коэффициенты концентраций; n – количество элементов, принимаемых в расчете при $K_c \geq 1,5$.

По полученным значениям пылевой нагрузки и суммарного показателя загрязнения устанавливались уровни загрязнения территории и экологической опасности в соответствии с методическими рекомендациями [29, 35, 36] (табл. 1).

Таблица 1. Уровни загрязнения и опасности в зависимости от значений пылевой нагрузки (P_n) и суммарного показателя загрязнения (Z_c) по результатам снегогеохимической съемки [29, 35, 36]

Table 1. Gradation by dust load and total pollution index during snow-geochemical survey [29, 35, 36]

P_n , мг/(м ² ·сут.) mg/(m ² ·day)	Z_c	Уровень загрязнения, уровень опасности Pollution level, hazard level
Менее 250 Less than 250	Менее 64 Less than 64	Низкий, неопасный Low, un-hazardous
251–450	64–128	Средний, умеренно-опасный Medium, moderately hazardous
451–850	128–256	Высокий, опасный High, hazardous
Более 850 Over 850	Более 256 Over 256	Очень высокий, чрезвычайно опасный Very high, highly hazardous

Построение картографического материала осуществлялось в программном обеспечении «Surfer 11» методом Natural Neighbor, а доработка карт проводилась в ПО «Corel Draw X7». Статистическая обработка данных (описательная статистика, проверка принадлежности статистических гипотез распределения, кластерный анализ, корреляционный анализ (параметрические критерии, коэффициенты парных корреляций Пирсона r) производилась в программном комплексе Statistica 8.0 с использованием учебного пособия [39]. В качестве средних величин пылевой нагрузки и содержания химических элементов в пробах использованы среднеарифметические значения.

Результаты и их обсуждение

Пылевая нагрузка. По результатам исследований установлено, что уровни пылевой нагрузки в районе расположения цементного завода в г. Искитим изменяются в широком диапазоне (от 57 до 1028 мг/(м²·сут.), многократно превышая фоновые показатели – в 8 раз в жилой зоне и до 147 раз вблизи границ предприятия (табл. 2, рис. 3). Среднее значение пылевой нагрузки в окрестностях цементного завода составляет 318 мг/(м²·сут.), что превышает фоновый уровень в 45 раз.

В север-северо-западном направлении от цементного завода и в районе карьера по добыче сырьевых материалов формируются средние уровни пылевого

загрязнения, соответствующие умеренно-опасной экологической опасности. Выявленная тенденция может быть обусловлена пылением в результате добычи и переработки сырья, обжига клинкера, производства и отгрузки цемента.

В юго-восточной и жилой зонах установлены низкие уровни пылевой нагрузки. Похожая закономерность в формировании уровней пылевой нагрузки ранее выявлена в окрестностях цементного завода, расположенного в Кемеровской области [40].

Таблица 2. Средние уровни пылевой нагрузки (P_n , мг/(м²·сут.) в зоне влияния цементного завода г. Искитим

Table 2. Average values of dust load in zones of influence of a cement plant in Iskitim

Зона (расстояние до границ предприятия) Zone (distance to the borders of the plant)	P_n , мг/(м ² ·сут.) mg/(m ² ·day)	Уровень загрязнения, уровень опасности Pollution level, hazard level [26, 32, 33]
Север-северо-западная (от 0,5 до 2,8 км) North-northwest (from 0,5 to 2,8 km)	412,9 ($\frac{78}{1028}$)	Средний, умеренно-опасный Medium, moderately hazardous
От границ предприятия к карьеру (от 0,7 до 1,7 км) From the plant boundaries to the open pit (from 0,7 to 1,7 km)	419,4 ($\frac{144}{932}$)	Средний, умеренно-опасный Medium, moderately hazardous
Юго-восточная (от 1,3 до 1,4 км) Southeastern (from 1,3 to 1,4 km)	155,9 ($\frac{126}{185}$)	Низкий, неопасный Low, un-hazardous
Жилая (вблизи завода – от 1,1 до 1,4 км) Residential (near the cement plant – from 1,1 to 1,4 km)	72,9 ($\frac{57}{102}$)	Низкий, неопасный Low, un-hazardous

Примечание: среднее ($\frac{\text{мин}}{\text{макс}}$); фон – 7 мг/(м²·сут.) [34, 35].

Note: average ($\frac{\text{min}}{\text{max}}$); background – 7 mg/(m²·day) [34, 35].

По мере удаления от границ завода на расстояние от 0,5 до 2,8 км в север-северо-западном направлении уровни пылевой нагрузки уменьшаются от 1028 до 78 мг/(м²·сут.) (рис. 2).

Наибольшие уровни пылевой нагрузки (1028 мг/(м²·сут.)) формируются в 0,5 км в север-северо-западном направлении от границ завода, а также в районе карьера (932 мг/(м²·сут.)) по добыче сырьевых компонентов, где уровень загрязнения изменяется от среднего до очень высокого (рис. 2). При удалении от завода на расстояние от 1,0 до 2,8 км значения пылевой нагрузки уменьшаются от 191 до 78 мг/(м²·сут.) и соответствуют низкому уровню загрязнения.

Наши результаты по распределению пылевой нагрузки сопоставимы с данными исследований новосибирских ученых [5], которые установили, что максимум выпадений неорганической пыли происходит в 450 м от основных источников и наибольшее распространение веществ наблюдается в северо-западном направлении от цементного завода вдоль долины р. Бердь. Такое распределение пыли связывают с возможным влиянием возвышенных форм рельефа, усилением скорости ветра по мере приближения к реке.

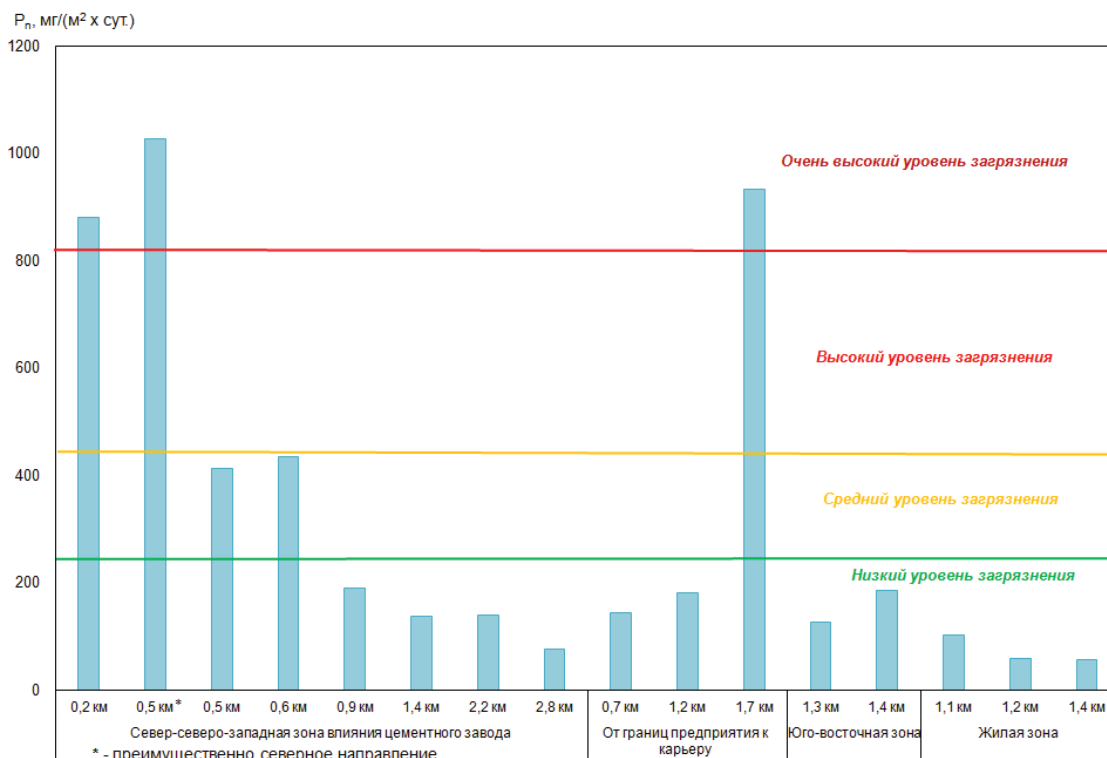


Рис. 2. Уровни пылевой нагрузки по мере удаления от границ цементного завода г. Искитим по данным снеговой съёмки

Fig. 2. Values of the dust load as it moves away from the boundaries of the cement plant according to snow survey data

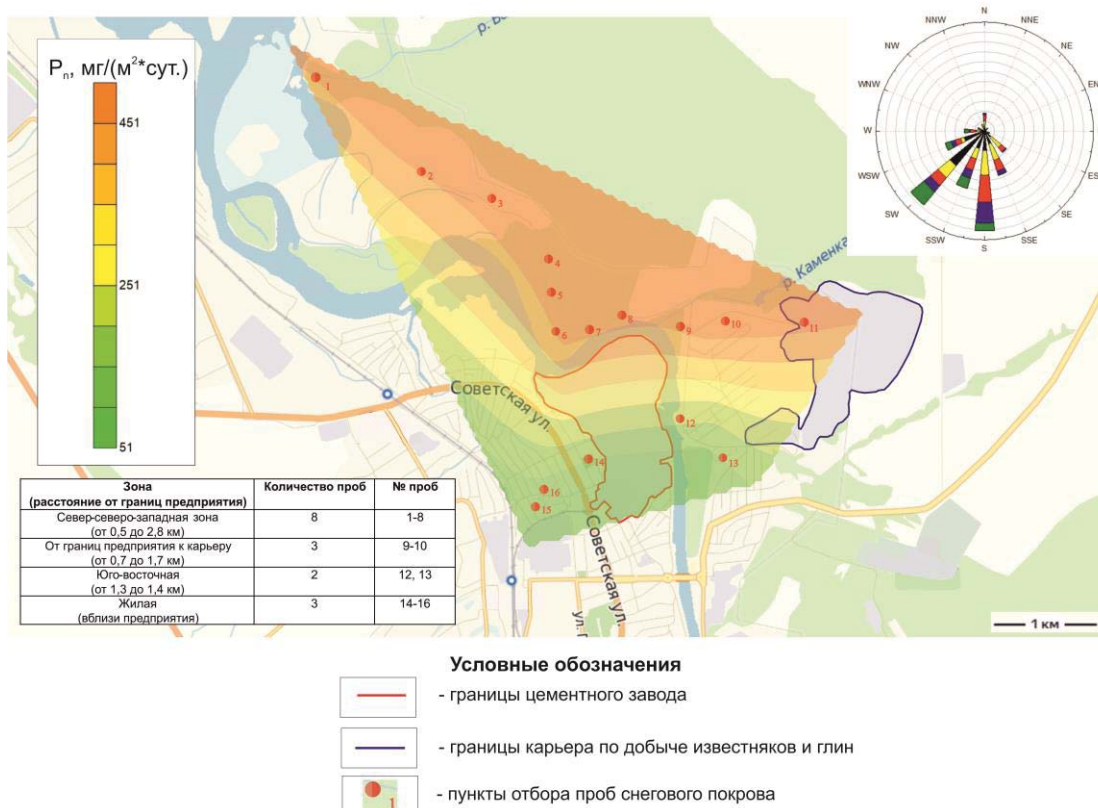


Рис. 3. Распределение пылевой нагрузки в зоне влияния цементного завода г. Искитим по данным снеговой съёмки (основа карты – Яндекс-карты; зимняя «роза» ветров построена в программе Origin, цветом обозначены скорость ветра)

Fig. 3. Distribution of dust load in the zone of influence of a cement plant in Iskitim, Novosibirsk Region (winter wind rose was created by the author in the Origin program, colors indicate wind speed)

Минеральный состав твердой фазы снегового покрова. Твердая фаза снегового покрова из зоны влияния цементного завода представлена кристаллической фазой, содержание которой изменяется от 82,4 до 93,0 %, а также аморфной фазой – от 7,0 до 17,6 %, соответственно. Кристаллическая фаза представлена минералами цементного клинкера – хатруритом (трехкальциевый силикат (алит) $(Ca_3(SiO_4)O)$) и браунмиллеритом (алюмоферрит кальция $(Ca_2(Al,Fe)_2O_5)$), а также кальцитом $(CaCO_3)$, кварцем (SiO_2) и магнезитом $(MgCO_3)$ (табл. 3).

Таблица 3. Минеральный состав твердой фазы снегового покрова из зоны влияния цементного завода г. Искитим, %

Table 3. Mineral composition of solid phase snow cover samples from the zones of influence of the cement plant in Iskitim, %

Минерал/Зона Mineral/Zone	Содержание/Content, %		
	Север-северо-западная зона (от 0,5 до 2,8 км) North-northwest zone (from 0,5 to 2,8 km)	От границ предприятия к карьеру (от 0,7 до 1,7 км) From the plant to the open pit (from 0,7 to 1,7 km)	Юго-восточная (от 1,3 до 1,4 км) Southeast (from 1,3 to 1,4 km)
Кристаллическая фаза Crystal phase	84,5 ($\frac{82,4}{85,9}$)	90,1 ($\frac{87,4}{93,0}$)	89,0
Аморфная фаза Amorphous phase	15,5 ($\frac{14,1}{17,6}$)	9,9 ($\frac{7,0}{14,1}$)	11,0
Минералы кристаллической фазы Minerals of the crystalline phase			
Кальцит/Calcite $(CaCO_3)$	64,8 ($\frac{59,2}{75,1}$)	93,0 ($\frac{89,8}{97,6}$)	90,5
Кварц/Quartz (SiO_2)	3,4 ($\frac{1,7}{6,0}$)	4,3 ($\frac{2,4}{5,5}$)	5,2
Браунмиллерит Brownmillerite $(Ca_2(Al, Fe)_2O_5)$	8,7 ($\frac{7,5}{11,4}$)	4,0 ($\frac{3,3}{4,7}$)	4,3
Хатрурит/Hatnurite $(Ca_3(SiO_4)O)$	27,6	–	–
Магнезит/Magnesite $(MgCO_3)$	7,6	–	–

Примечание/Note: среднее ($\frac{min}{max}$)/average ($\frac{min}{max}$).

В твердой фазе снегового покрова выявлено преобладание кальцита – основного минерала известняка, который добывается на близко расположенном карьере. Район карьера по добыче известняков и глин представлен максимальными содержаниями кальцита $(CaCO_3)$, которые уменьшаются по мере отдаления от карьера.

В небольшом количестве в твердой фазе снегового покрова выделяются такие минералы, как кварц (SiO_2) и магнезит $(MgCO_3)$, который в виде примеси входит в состав известняка. Твердая фаза снегового покрова отличается наличием хатрурита в север-северо-западной зоне и небольшими содержаниями браунмиллерита во всех исследуемых направлениях. Минералы цементного клинкера имеют особенности минерального состава, которые зависят от условий обжига. Содержание примесей в кристаллах хатрури-

та могут колебаться в широких пределах: Al_2O_3 (от 0,4 до 1,8 %), MgO (от 0,3 до 2,1 %), Fe_2O_3 (от 0,2 до 1,9 %) и др. Браунмиллерит может включать в свою кристаллическую решетку посторонние оксиды, а ферритная фаза алюмоферрита кальция не обладает определенным химическим составом, а образует твердые растворы с переменным соотношением оксидов Al_2O_3/Fe_2O_3 [41].

Стоит отметить, что аналогичным минеральным составом характеризуются пробы твердой фазы снега из зоны влияния цементного завода г. Топки, в которых также нами были обнаружены минералы кальцита, кварца и цементного клинкера [39]. Анализ минерального состава пыли, улавливаемой при очистке выбросов печей для обжига клинкера на заводе, показал, что пыль представлена преимущественно неорганической фазой и состоит из кварца (SiO_2) , кальцита $(CaCO_3)$ и доломита $(Ca, Mg)CO_3$, а также браунмиллерита $(Ca_2(Al, Fe)_2O_5)$, хатрурита $(Ca_3(SiO_4)O)$ [39].

Геохимическая характеристика твердой фазы снегового покрова. Твердая фаза снегового покрова из окрестностей цементного завода характеризуется широким диапазоном содержаний химических элементов (рис. 4) с проявлением точечных аномалий в пробах с высокими значениями.

Содержание химических элементов в твердой фазе снегового покрова превышает фоновые значения от 2 до 29,7 раз. Определено, что кальций (Ca) ($K_c=29,7$), иттербий (Yb), тербий (Tb), цинк (Zn), олово (Sb), лантан (La) (K_c от 3,1 до 5,7) составляют группу с высоким накоплением элементов (табл. 4). Максимальные содержания кальция (Ca) (K_c от 23,7 до 29,7) определены на расстоянии в 0,5 км от границ предприятия, по мере удаления от границ предприятия содержания кальция в пробах твердой фазы снегового покрова незначительно уменьшаются – от 1,1 до 2,6 раз (рис. 7). В север-северо-западном направлении содержания кальция превышают фоновые показатели в среднем в 20,7 раз, по направлению к карьере по добыче сырьевых компонентов – в 23,2 раза; в юго-восточном – в 22 раза. Жилая зона характеризуется наименьшими содержаниями кальция в выборке, превышающими фон в среднем в 14,6 раз. Отмечается корреляционная связь между кальцием и пылевой нагрузкой ($r=0,72$), что также подтверждается их схожим пространственным распределением в зоне воздействия завода (рис. 5). На расстоянии 2,2–2,8 км от границ предприятия выявлено высокое накопление иттербия (Yb) (K_c 6,1 и 5,4), тербия (Tb) (K_c 5,0 и 6,4), лантана (La) ($K_c=3,5$). Значения остальных химических элементов находятся в твердой фазе снегового покрова в пределах фона.

Суммарный показатель загрязнения ($Z_c=46,1$) соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией в соответствии с градацией [29] (табл. 4).

Наибольшие значения коэффициентов концентрации выделяются у кальция, превышающего фон от 23,7 до 29,7 раз, особенно в направлении карьера по добыче сырьевых компонентов для производства цемента. Кальций может поступать в атмосферный воздух в результате буровзрывных работ, осуществляе-

мых для добычи известняка. Кальций содержится в основном компоненте сырьевой смеси для производства цемента – известняке, в состав которого входит

кальцит (CaCO_3), что подтверждается результатами анализа элементного состава твердой фазы снегового покрова (рис. 4).

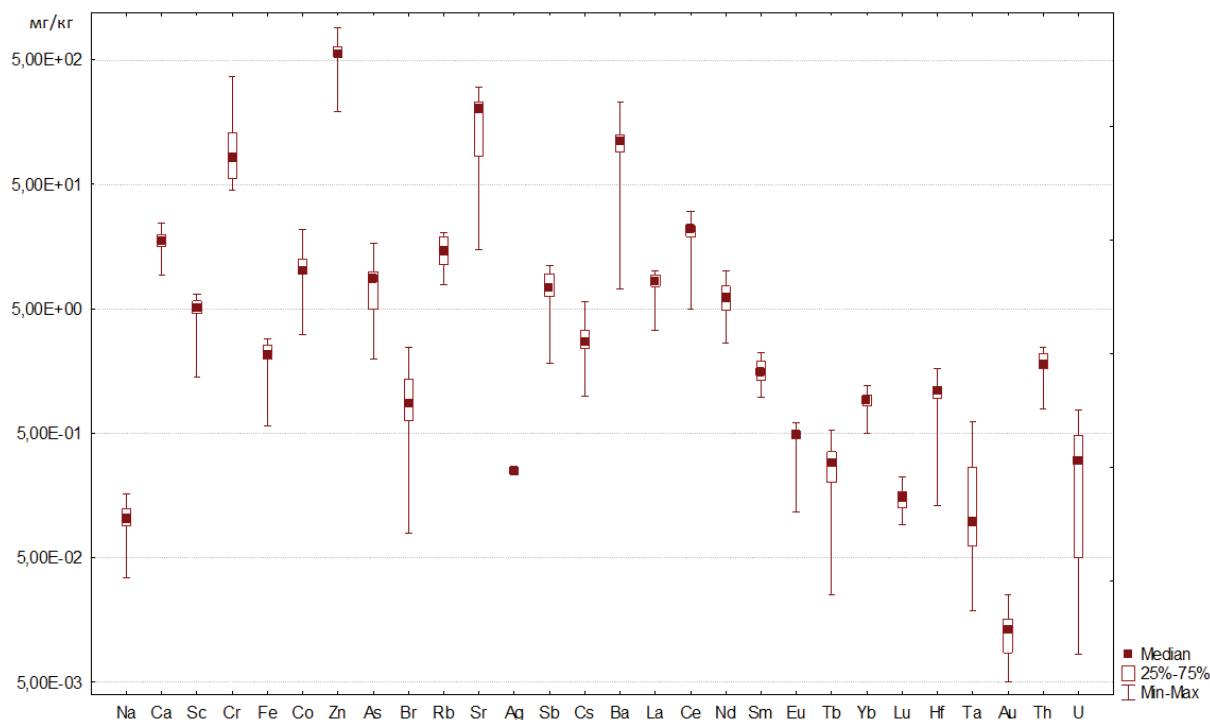


Рис. 4. Диаграмма размаха содержаний химических элементов в твердой фазе снегового покрова в окрестностях цементного завода г. Искитим (содержание Na, Ca, Fe – в %, остальные химические элементы – в мг/кг)

Fig. 4. Diagram of the range of the content of chemical elements in the samples of the solid phase of the snow cover near the cement plant (content of Na, Ca, Fe – in %, other chemical elements – in mg/kg)

Таблица 4. Геохимическая характеристика твердой фазы снегового покрова и суммарный показатель загрязнения в зоне влияния цементного завода г. Искитим

Table 4. Geochemical characteristics of samples of snow cover solid phase and the value of the total pollution index in samples in the zones of influence of the Iskitim cement plant

Зона (расстояние до границ предприятия) Zone (distance to the borders of the plant)	Геохимический ряд элементов по величинам K_c Geochemical series of elements by K_c values	Z_c	Уровень загрязнения, уровень опасности Pollution level, hazard level [29, 35, 36]
Север-северо-западная (от 0,5 до 2,8 км) North-northwest (from 0,5 to 2,8 km)	$\text{Ca}_{22,9}\text{-Yb}_{5,2}\text{-Tb}_{4,7}\text{-Zn}_{4,3}\text{-Sb}_{3,9}\text{-La}_{3,1}\text{-Sm}_{2,7}\text{-U}_{2,3}\text{-Ce}_{2,0}$	54 ($\frac{38}{58}$)	Низкий, неопасный Low, un Hazardous
От границ предприятия к карьере (от 0,7 до 1,7 км) From the plant to the open pit (from 0,7 to 1,7 km)	$\text{Ca}_{23,2}\text{-Tb}_{4,0}\text{-Yb}_{3,6}\text{-Zn}_{3,3}\text{-Sb}_{2,3}\text{-Sm}_{2,2}\text{-La}_{2,1}\text{-Ce}_{1,7}$	51 ($\frac{28}{47}$)	
Юго-восточная (от 1,3 до 1,4 км) Southeastern (from 1,3 to 1,4 km)	$\text{Ca}_{22,0}\text{-Tb}_{7,0}\text{-Zn}_{4,3}\text{-Yb}_{4,3}\text{-Sm}_{3,4}\text{-La}_{3,0}\text{-Sr}_{2,7}\text{-Sb}_{2,7}\text{-Ce}_{2,5}$	53 ($\frac{44}{56}$)	
Жилая (вблизи завода) Residential (near the factory)	$\text{Ca}_{14,6}\text{-Zn}_{7,4}\text{-Tb}_{3,9}\text{-Yb}_{3,8}\text{-Sm}_{3,5}\text{-La}_{3,1}\text{-Sb}_{2,8}\text{-Sr}_{2,1}\text{-Ce}_{1,9}\text{-Cr}_{1,7}$	47 ($\frac{37}{44}$)	

Примечание: представлены химические элементы с $K_c \geq 1,5$; среднее ($\frac{\text{мин}}{\text{макс}}$).

Note: chemical elements with $K_c \geq 1,5$ are presented; average ($\frac{\text{мин}}{\text{макс}}$).

По результатам корреляционного анализа в пробах твердой фазы снегового покрова выявлены коэффициенты корреляции (r) между химическими элементами, которые показывают степень связи между химическими элементами и могут указывать на их единые источники

поступления (рис. 6). Наибольшее количество корреляций имеют Fe, Co, Zn, Ba, La, Sm, Lu, Th. Редкоземельные элементы образуют корреляционные связи преимущественно внутри группы. Примерами таких корреляций являются La и Sc ($r=0,93$), Sm и Lu ($r=0,84$), Yb и

La ($r=0,60$), Sm и La ($r=0,62$) и другие. Перечисленные химические элементы входят в состав сырьевых добавок:

в шлаке – La (92,2 мг/кг), Yb (3,5 мг/кг), Lu (0,4 мг/кг), в глине – Sc (22,2 мг/кг) и Sm (5,7 мг/кг).

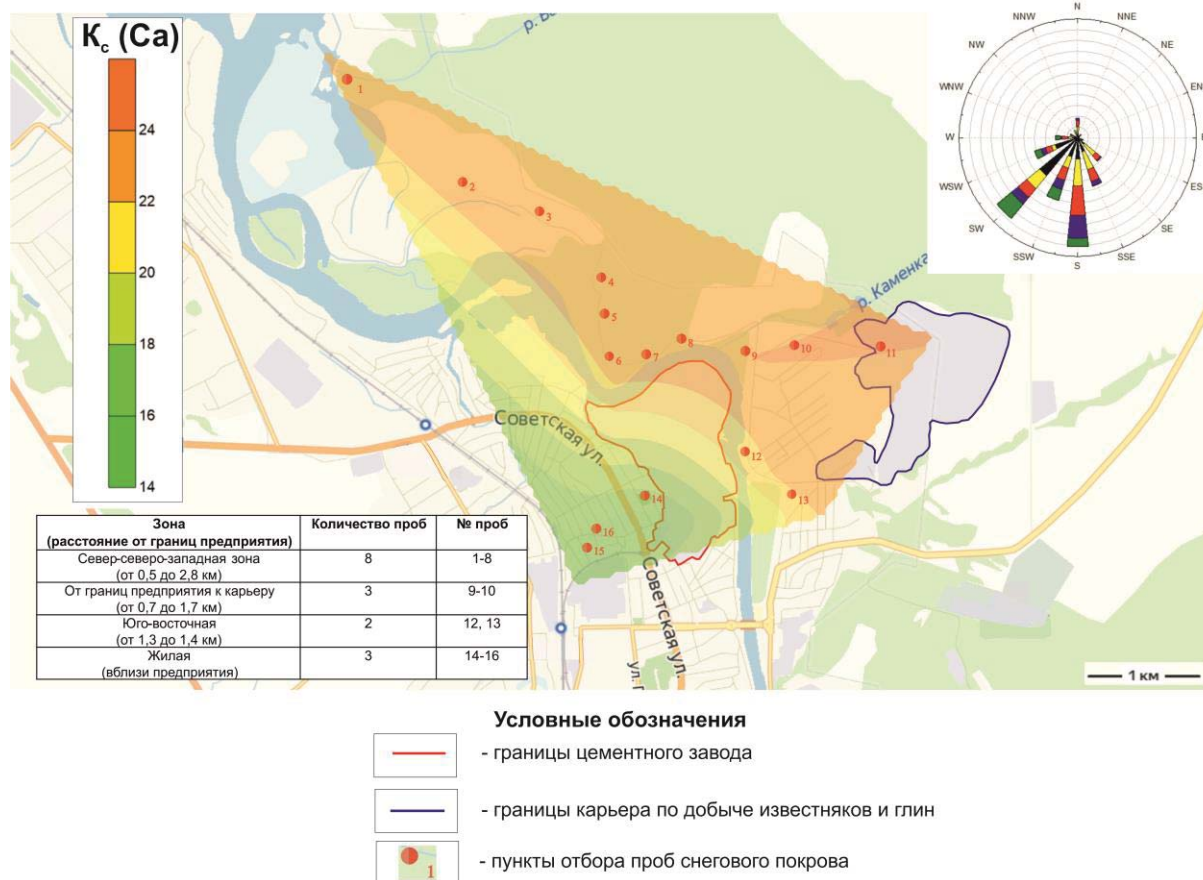


Рис. 5. Карта-схема распределения кальция по значениям коэффициентов концентрации в зоне влияния цементного завода г. Искитим (основа карты – Яндекс-карты; зимняя «роза» ветров построена в программе Origin, цветом обозначены скорость ветра)

Fig. 5. Concentration coefficient of calcium distribution map in the zones of influence of the cement plant (winter wind rose was created by the author in the Origin program, colors indicate wind speed)

В матрице корреляционных связей выделяются отрицательные связи (r от $-0,5$ до $-0,58$) между Ca и некоторыми маркерными элементами (Na, Cr) для выбросов цементных заводов, которые представлены в справочнике НДТ [42], а также с Vg и Th. Это может свидетельствовать о разных формах нахождения этих элементов в твердой фазе снегового покрова и о различных источниках их поступления, в частности используемых сырьевых компонентов. Как отмечалось выше, Ca – это основной компонент известняка. Например, высокие концентрации Cr определены в огарках (254 мг/кг), а Th – в шлаке (7,2 мг/кг). Положительная связь обнаружена между U и Ca ($r=0,62$). Следует отметить, что в химический состав шлака входят как U (17,4 мг/кг), так и Ca (27,5 %), что может объяснять ассоциацию между этими элементами.

Ранее отмечалось, что в справочнике по наилучшим доступным технологиям [42] представлены элементы-маркеры выбросов производства цемента, к которым относятся барий (Ba), хром (Cr), мышьяк (As), кальций (Ca), железо (Fe), сурьма (Sb), цинк (Zn), натрий (Na). Данная группа химических элементов образует характерные корреляции между собой и

другими химическими элементами. Например, As-Ta, Yb-U-Sb, Tb-Ba, Zn-Cr, Th-Na, Fe-La (рис. 6).

Исследования химического состава сырья (глина, известняк) и корректирующих добавок для производства цемента (огарки, шлак) позволили сделать предположение о поступлении некоторых химических элементов в окружающую среду в составе твердых частиц в результате применения данных сырьевых компонентов (рис. 7). Например, источником U, Th, Yb, Tb, La может быть шлак, а As, Sb, Ba, Zn, Cr, Fe – пиритные огарки. Вероятно, этим можно объяснить сильные геохимические связи между перечисленными химическими элементами. К химическим элементам, не образующим корреляций, относятся Cs, Rb, Nd.

Кластерный анализ выделяет группы характерных связей между химическими элементами. Графические результаты кластерного анализа микроэлементов (рис. 6) демонстрируют устойчивое разбиение 26 химических элементов на 7 значимых кластеров.

Кластеры с характерными геохимическими связями образованы преимущественно редкоземельными химическими элементами, что может указывать на единый источник их поступления. Обращает на себя

внимание кальций, который не входит ни в один из образованных кластеров при уровне значимости $r_{0,07}=0,51$, вероятно, из-за преобладания его содержания в пробах твердой фазы снегового покрова.

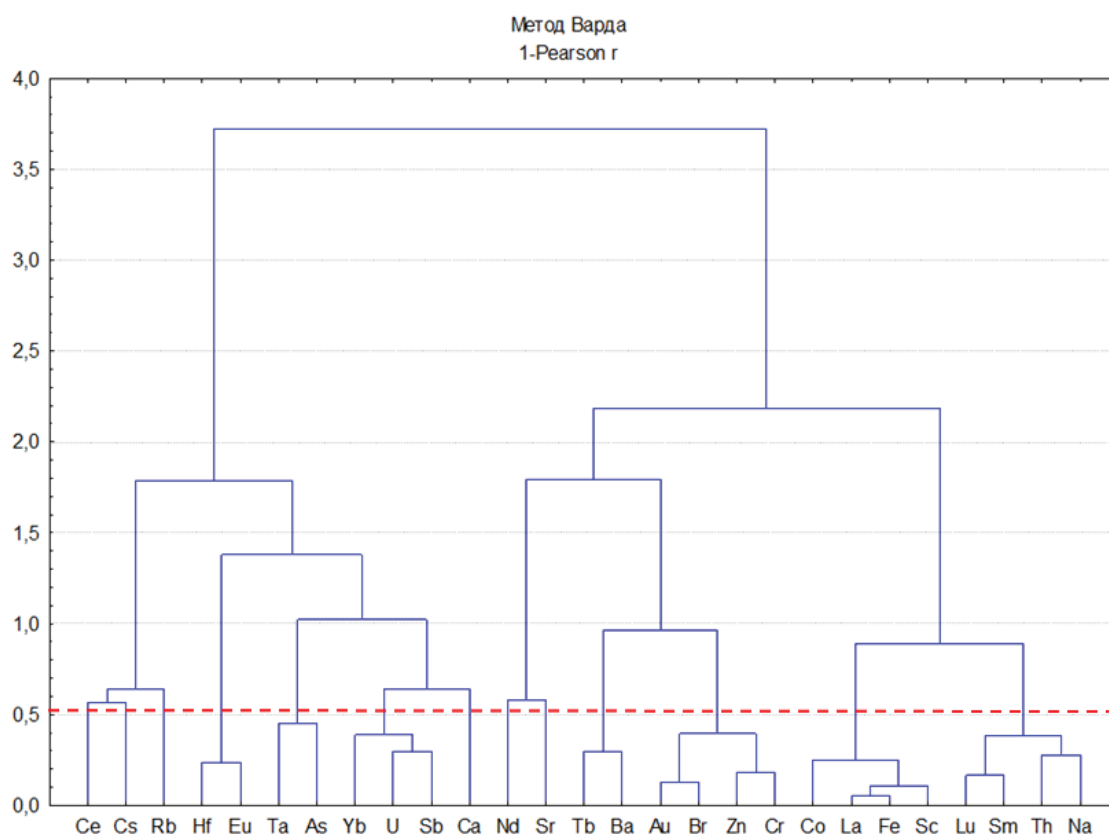


Рис. 6. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в твердой фазе снегового покрова в зоне влияния цементного завода г. Искитим (1-Pearson $r_{0,07}=0,51$; объем выборки – 16 проб)

Fig. 6. Dendrogram of the correlation matrix of the geochemical spectrum of elements in the solid phase of snow cover in the zone of influence of the cement plant in Iskitim (1-Pearson $r(0,07)=0,51$; 16 samples)

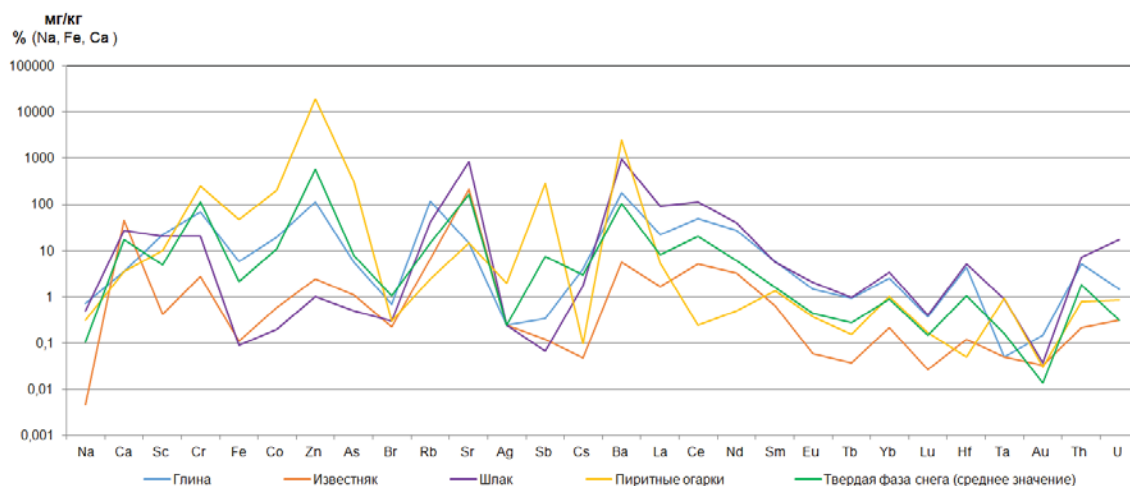


Рис. 7. Сравнение химических составов сырьевых компонентов, корректирующих добавок для производства цемента, проб твердой фазы снегового покрова

Fig. 7. Comparison of elemental compositions of raw materials, corrective additives for cement production, samples of snow cover solid phase

Положение Ca в графических результатах факторного анализа также указывает на выявленную нами минеральную форму его нахождения (кальцит (CaCO_3)) в составе твердой фазы снегового покрова (рис. 8). Рассмотрение факторных нагрузок 1 и 2 свя-

зано с тем, что они имеют наибольшее количество корреляций. Предположительно, механизм формирования факторов 1 и 2 зависит от химического состава корректирующих добавок (фактор 1) и использования главных сырьевых компонентов – известняка (фак-

тор 2). На рис. 8 показано, что фактор 1 (34,88 %) оказывает наибольшее влияние на La, Ba, Sm, Na, Cr, Fe, Th, Zn, Lu, Br. Фактор 2 (18,90 %) влияет преимущественно на Ca.

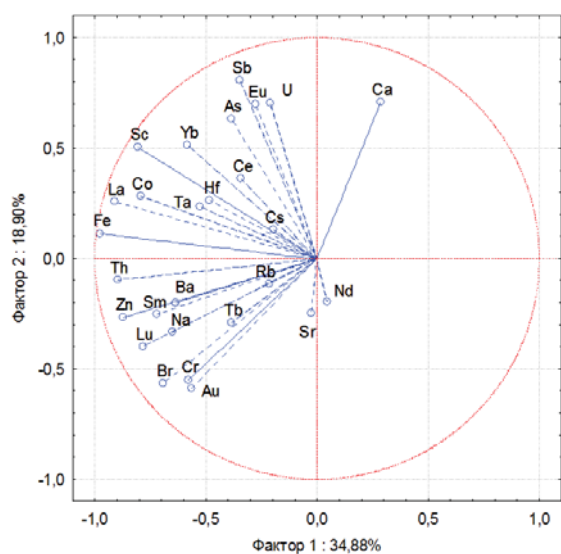


Рис. 8. Значения вращаемых факторных нагрузок в твердой фазе снегового покрова в зоне влияния цементного завода г. Искитим

Fig. 8. Values of rotated factor loads in samples of snow cover solid phase in the zone of influence of the cement plant in Iskitim

Элементы-индикаторы выбросов производства цемента по мере отдаления от границ предприятия в северо-западном направлении и по направлению к карьере по добыче сырьевых материалов имеют сходный характер распределения (рис. 9). На рассто-

янии 1,7 км от границ цементного завода все химические элементы, кроме кальция, имеют тенденцию к снижению содержаний от 3 до 19 раз в пробах твердой фазы снегового покрова. Вероятно, такое распределение химических элементов связано с добычей известняка, в процессе которой происходит активное пыление, и формируются более высокие содержания кальция по сравнению с другими химическими элементами.

Таким образом, техногенная геохимическая специализация твердой фазы снегового покрова в зоне влияния цементного завода определяется уровнями накопления элементов-индикаторов производства цемента (Ca, Ba, Cr, As, Fe, Sb, Zn, Na) и Yb, Tb, Sb, La, Sm, U, Ce. Данные химические элементы в составе атмосферных выпадений могут поступать в снеговой покров в результате применения различных корректирующих добавок для производства цемента (шлак, песок, трифолин и другие) [43]. Глинистые породы, являющиеся одним из основных компонентов для производства цемента, могут аккумулировать данные химические элементы и привносить их в сырьевую смесь в качестве примесей [44, 45]. По данным [38], элементный состав цементной пыли представлен такими химическими элементами, как U, Yb, Ba, Ca, Hf, Sr, Tb, La, Ta, Sm, Ce, Th, Na. Причём большая доля La, Ce, Eu и Yb сосредоточена в немагнитной фракции цементной пыли. Не исключается возможность поступления перечисленных химических элементов в окружающую среду в результате дальнего переноса при сжигании угля с выбросами котельных или при печном отоплении жилых домов в г. Искитим. Так, угли Кузнецкого бассейна характеризуются редкометальной геохимической специализацией [46].

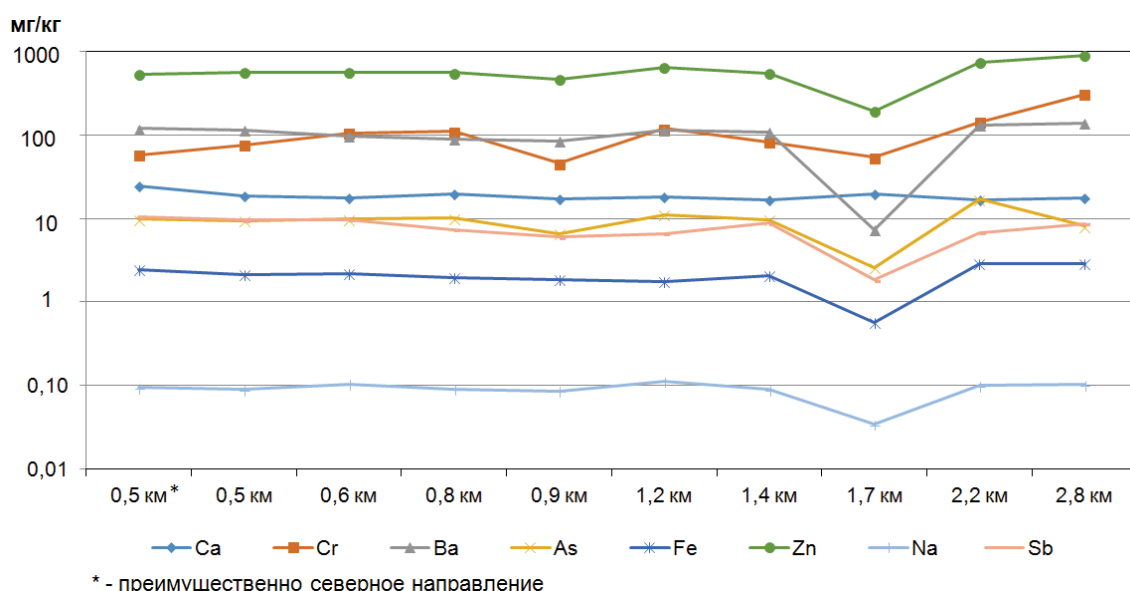


Рис. 9. Распределение элементов-индикаторов производства цемента в твердой фазе снегового покрова по мере удаления от цементного завода г. Искитим в северо-западном направлении и в направлении к карьере (натрий (Na), железо (Fe), кальций (Ca) – в %, остальные химические элементы – в мг/кг)

Fig. 9. Distribution of elements-indicators of cement production in snow cover solid phase with distance from the cement plant in the north-west direction and towards the open pit (sodium (Na), iron (Fe), calcium (Ca) – in %, other chemical elements – in mg/kg)

Согласно литературным данным [41], при оценке химического состава клинкера происходит разделение химических элементов на основные и второстепенные. Основными химическими элементами клинкера являются Ca, Si, Al, Fe (концентрация в клинкере до 10^3 мас. %), а второстепенные представлены Mg, Mn, K, Na, P, K (концентрация в клинкере до 10^1 мас. %). Химический состав портландцемента отличается наличием основных элементов – Ca, Si, Al, Fe (концентрация в клинкере до 10^3 мас. %) и второ-

степенных элементов – Mg, Mn, K, Na, P, K (концентрация в клинкере до 10^1 мас. %) [41]. Основные элементы в пробах твердой фазы снегового покрова имеют преобладающие значения над второстепенными элементами, что соответствует литературным данным, приведенным выше. Наибольшие значения содержания химических элементов наблюдаются в твердой фазе снегового покрова на расстоянии до 0,5 км от границ предприятия (рис. 10).

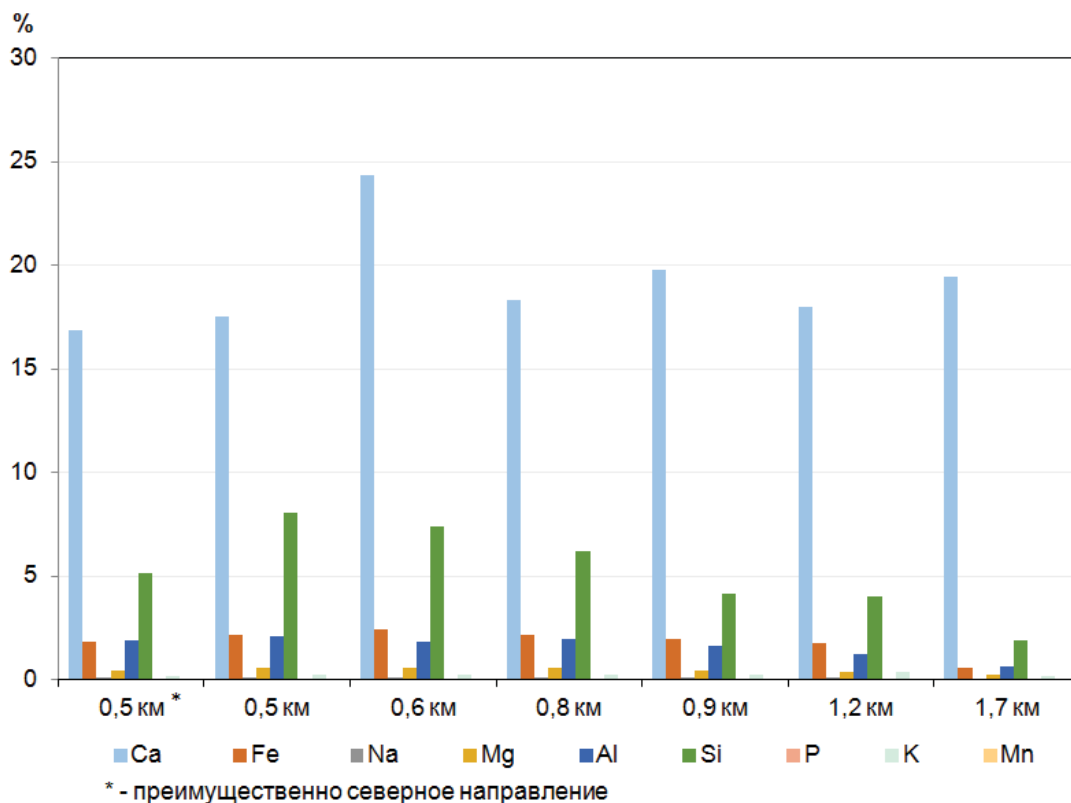


Рис. 10. Распределение основных и второстепенных химических элементов, содержащихся в твердой фазе снегового покрова, по мере удаления от цементного завода в северо-западном направлении, % (кальций (Ca), железо (Fe), натрий (Na) – инструментальный нейтронно-активационный анализ; магний (Mg), алюминий (Al), кремний (Si), фосфор (P), калий (K), марганец (Mn) – масс спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой)

Fig. 10. Distribution of the main and secondary chemical elements in the samples of snow cover solid phase as it moves away from the cement plant in the north-west direction, % (Ca, Fe, Na – instrumental neutron activation analysis; Mg, Al, Si, P, K, Mn – inductively coupled plasma mass spectrometry)

Характеристика микрочастиц в твердой фазе снегового покрова. Результаты изучения состава проб твердой фазы снегового покрова из ближней зоны влияния завода (до 0,5 км) и района расположения карьера методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показали наличие частиц оксидов кальция и железа (рис. 11, а), алюмосиликатных микросферул (рис. 12, а, б), частиц кальциевого состава с примесью Pb и Si (рис. 11, б). В твердой фазе снегового покрова из зоны влияния цементного завода обнаружены частицы, различающиеся размером, составом и формами. В пробе, отобранной в районе карьера, обнаружены частицы, предположительно, кальцита с примесями Si, Mg, Al (рис. 11), а также алюмосиликатные сферулы с примесями K, Ca, Zn.

Алюмосиликатные сферулы с примесью Fe, Zn, Pb могут поступать в атмосферный воздух в результате обжига сырьевой смеси, а также сжигания угля.

Химический состав частиц характеризуется преобладающим количеством оксидов Ca, Fe, Al, Si, в качестве примесей встречается Mg. Оксидный состав портландцементного клинкера, согласно [27], представлен оксидами Ca (63–67 %), Si (21–24 %), Al (4–7 %) Fe (3–5 %), а также Mg (≤ 5 %). Элементное картирование позволяет оценить химический состав проб. В результате проведения элементного картирования на одном участке пробы твердой фазы снегового покрова было выявлено, что исследуемое вещество состоит преимущественно из частиц кальциевого состава, в меньших содержаниях выделяются частицы кремниевый и алюминиевый состава (рис. 13).

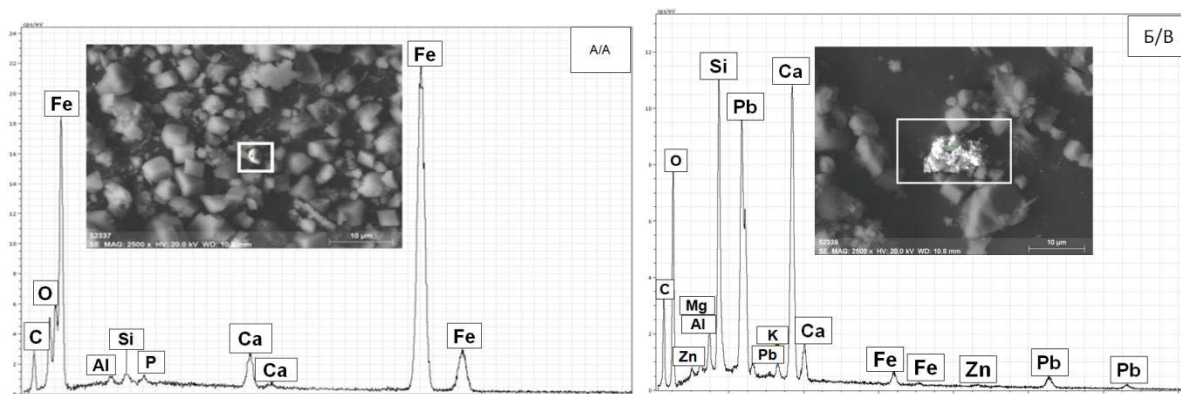


Рис. 11. Микроснимки и энергодисперсионные спектры микрочастиц в твердой фазе снегового покрова в зоне влияния цементного завода г. Искитим: А) микрочастица, содержащая оксиды Fe и Ca, размером 2,7 мкм; Б) микрочастица кальциевого состава с примесью Pb и Si, размером 12,4 мкм

Fig. 11. Images and energy dispersive spectra of particles in solid phase of snow cover in the zones of influence of the Iskitim cement plant: A) particle of Fe and Ca oxides, size 2,7 μm; B) particle of calcium composition with trace of Pb and Si, size 12,4 μm

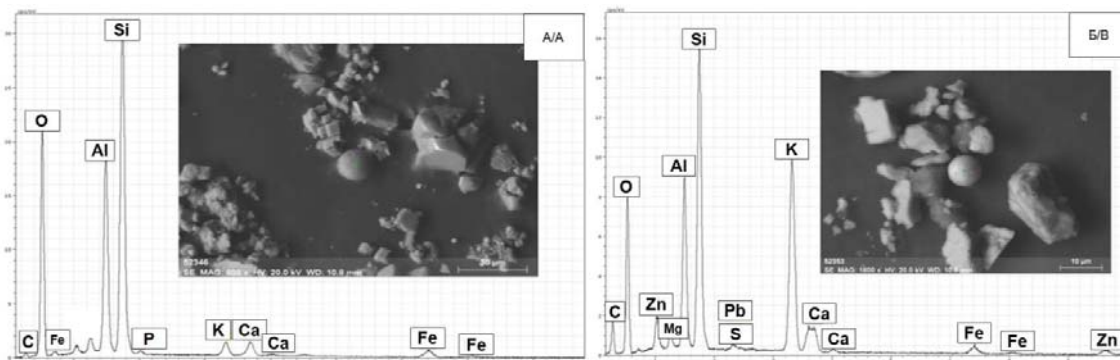


Рис. 12. Микроснимки и энергодисперсионные спектры алюмосиликатных микросферул в твердой фазе снегового покрова: А) микросферула с примесями Fe размером 16,7 мкм из зоны влияния цементного завода г. Искитим; Б) микросферула с примесями Zn, Pb, S размерами 8,2 мкм из района карьера

Fig. 12. Images and energy dispersive spectra of aluminosilicate microspheres in solid phase of snow cover: A) microspherule with Fe impurities measuring 16,7 μm in the zones of influence of the Iskitim cement plant; B) microspherule with Zn, Pb, S impurities measuring 8,2 μm in the open pit area

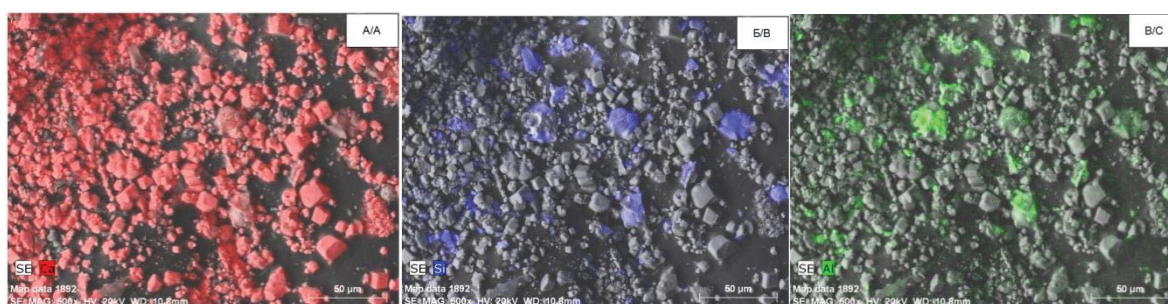


Рис. 13. Элементное картирование участка пробы твердой фазы снегового покрова из север-северо-западной зоны влияния цементного завода г. Искитим: А) Ca; Б) Si; В) Al

Fig. 13. Elemental mapping of the sample site of the north-north-west zone of influence of the cement plant: A) calcium mapping; B) silicon mapping; C) aluminum mapping

Выводы

В результате проведенной оценки пылеаэрозольного загрязнения в окрестностях цементного завода, расположенного в г. Искитим Новосибирской области, по данным изучения уровня пылевой нагрузки, элементного и минерального состава твердой фазы снегового покрова можно сделать следующие выводы:

1. Очень высокий уровень пылевой нагрузки ($1028 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) формируется на расстоянии 0,5 км от границ предприятия. Величина пылевой нагрузки по мере приближения от границ предприятия к карьере по добыче сырьевых компонентов соответствует среднему уровню загрязнения и составляет $419 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$. Среднее значение пы-

- левой нагрузки составляет 196 мг/(м²·сут.) на расстоянии от 1,0 до 2,8 км от границ цементного завода в северо-западном направлении, что соответствует низкому уровню загрязнения. Юго-восточная и жилищная зоны рассматриваемой территории характеризуются низким уровнем загрязнения.
2. Минеральная составляющая твердой фазы снегового покрова представлена минералами цементного клинкера – хатрурит (трехкальциевый силикат (алит)) (Ca₃(SiO₄)O) и браунмиллерит (алюмоферрит кальция) (Ca₂(Al, Fe)₂O₅), а также минералами сырьевых компонентов – кальцит (CaCO₃), кварц (SiO₂) и магнезит (MgCO₃). При этом в северо-западной зоне влияния отмечается преобладание минералов цементного клинкера.
 3. Геохимическая специализация твердой фазы снегового покрова в окрестностях цементного завода определяется высокими уровнями накопления Ca (от 14 до 23 раз выше фона), Zn, Sr, Sb, Tb, Yb, La, Sm, U (от 2 до 7 раз выше фона). Элементы-индикаторы (Ba, Cr, As, Ca, Fe, Sb, Zn, Na), которые определены в справочнике наилучших доступных технологий как специфичные в составе выбросов цементного производства, в твердой фазе снегового покрова находятся на уровне фона (As, Ba, Na, Fe) или превышают фон от 2 до 29 раз (Cr, Ca, Sb, Zn). Химические элементы образуют между собой корреляционные связи (Zn-Cr, As-Ta, Yb-U-Sb, Tb-Ba, Th-Na, Fe-La), отражающие элементный состав используемого сырья и корректирующих добавок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56828.47-2019. Наилучшие доступные технологии. Производство цемента. Выбор маркерных показателей для выбросов в атмосферу от промышленных источников. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с.
 2. Силосы как цементная бомба // sovplym.ru. URL: <https://sovplym.ru/blogs/filtr-silosa-cementa/> (дата обращения 22.06.2022).
 3. Косорукова О.Е., Крылова О.К. Загрязнение окружающей среды цементной промышленностью // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2019. – Т. 2. – С. 495–496.
 4. Морозов С.В., Рапута В.Ф., Коковкин В.В. Оценка выпадений органических и неорганических примесей в окрестностях цементного завода // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь. – 2019. – Т. 4. – № 1. – С. 113–120.
 5. Мониторинг загрязнения снежного покрова в районе Искитимского цементного завода / А.Ф. Щербатов, В.Ф. Рапута, В.В. Турбинский, В.А. Хмельев, С.Е. Олькин, Т.В. Ярославцева // Дистанц. методы зонд. Земли и фотограмм., мониторинг окр. среды, геокол. (Интерэкспо ГЕО-Сибирь). – 2014. – Т. 1. – С. 163–168.
 6. Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 9 (7). – С. 950–959.
 7. Оценка загрязнения атмосферного воздуха пылью по данным снегосъемки на основе реконструкции полей выпадений / А.Ф. Щербатов, В.Ф. Рапута, В.В. Турбинский, Т.В. Ярославцева // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 2. – С. 42–47.
 8. Environmental forensic investigation of the air pollution from a cement manufacturing unit / Muhammed Siddik Abdul Samad, Prem Mohan, G.K. Varghese, Irfan Khurshed Shah, Babu J. Alappat // Environmental Forensics. – 2019. – V. 21 (1). – P. 37–47.
 4. Установлен низкий уровень загрязнения снегового покрова 28 химическими элементами в результате расчета суммарного показателя загрязнения и сопоставления полученных значений с общепринятой градацией [26] в зоне влияния цементного завода.
 5. Выявлены микрочастицы оксидов кальция и железа, алюмосиликатные сферулы и частицы кальциевого состава с примесями металлов в твердой фазе снегового покрова. Размеры частиц варьируются от 2,7 до 64,5 мкм. По результатам элементного картирования выявлено преобладание частиц кальциевого состава.
- Авторы выражают благодарность аналитикам ядерно-геохимической лаборатории ТПУ Александру Федоровичу Судыко, Ларисе Васильевне Богутской, директору химико-аналитического центра «Плазма» (г. Томск) Нине Викторовне Федюниной за выполнение лабораторно-аналитических работ по определению химического состава проб твердой фазы снегового покрова, старшему преподавателю ОГ ТПУ, канд. геол.-минерал. наук Сергею Сергеевичу Ильенку за помощь в изучении микрочастиц на сканирующем электронном микроскопе, доценту ОГ ТПУ, канд. геол.-минерал. наук Булату Ринчиновичу Соктоеву за консультацию по изучению проб на рентгеновском дифрактометре..*
- Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Отбор и подготовка проб снегового покрова выполнены при частичной финансовой поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН 0266-2022-0028.*

18. Drack J.M.E., Vazquez D.P. Morphological response of a cactus to cement dust pollution // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2018. – V. 148. – P. 571–577.
19. Assessment of effect of cement dust from cement factory on elemental properties of some cultivated crops, Obajana, Kogi State, Nigeria / N.O. Olatunbosun, B.A. Sawa, A. Jibrin, A.E. Ilori // *J. Geogr. Environ. Earth. Sci. Int.* – 2020. – V. 24 (1). – P. 63–69.
20. Lamare R.E., Singh O.P. Effect of cement dust on soil physico-chemical properties around cement plants in Jaintia Hills, Meghalaya // *Environ. Eng. Res.* – 2020. – V. 25 (3). – P. 409–417.
21. Magnetic properties and element concentrations in lichens exposed to airborne pollutants released during cement production / L. Paoli, A.I. Winkler, A. Guttova, L. Sagnotti, A. Grassi, A. Lackovicova, D. Senko, S. Loppi // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2017. – V. 24. – P. 12063–12080.
22. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang // *Ecological Indicators*. – 2019. – № 104. – P. 24–31.
23. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В. Мониторинг загрязнения почв в районе воздействия ОАО Новоросцемент // *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). – 2015. – № 10. – С. 369–376.
24. Турбина Е.С. Оценка пылевого загрязнения атмосферного воздуха Теплоозерским цементным заводом методом снеговой съемки // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. – 2016. – № 3. – С. 58–65.
25. Kozłowski R., Szwał M., Jarzyna K. Analysis of snow pollutants in an industrial urban zone near the city of Ostrowiec Swietokrzyski // *Ecological Chemistry and Engineering*. – 2018. – V. 25 (1). – P. 7–18.
26. Инвестиционный паспорт г. Искитим 2018 г. // nso. 2014. URL: https://www.nso.ru/sites/test.new.nso.ru/wodby_files/files/wiki/2014/01/iskitim.pdf (дата обращения 17.12.2019).
27. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – М.: Минприроды России; НПФ «Кадастр», 2019. – 844 с.
28. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2021 году. – Новосибирск, 2022. – 180 с.
29. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
30. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Госкомгидромет, 1991. – 693 с.
31. Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северовосточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 06. – С. 491–495.
32. Оценка аэротехногенного загрязнения в окрестностях угольных и нефтяных котельных по состоянию снегового покрова (на примере Томской области) / А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Т.С. Шахова, Е.А. Филимоненко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 116–130.
33. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 276 с.
34. Язиков Е.Г. Разработка методологии комплексной эколого-геохимической оценки состояния природной среды (на примере объектов юга Западной Сибири) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 304. – Вып. 1. – С. 325–336.
35. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.Ш. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
36. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.В. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // *Вестник Московского ун-та. Сер. 5: «География»*. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
37. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 205 с.
38. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
39. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. II. Компьютерный практикум. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 150 с.
40. Таловская А.В., Володина Д.А., Язиков Е.Г. Макроэлементный и минерально-фазовый состав пыли в зоне воздействия цементного завода по данным изучения снегового покрова (Кемеровская обл.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2019. – № 2. – С. 201–210.
41. Штарк Й., Вихт Б. Цемент и известь. – Киев: Изд-во института строительных материалов им. Ф.А. Фингера Баухаус-Университета, 2008. – 480 с.
42. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента. – М.: Бюро НДТ, 2015. – 305 с.
43. Письмо от 18.09.2003 г. N НК-5830/4 Об инвестициях в развитие цементной промышленности и об утилизации при производстве цемента отходов других отраслей экономики, в том числе бытовых // docs.cndt. URL: <https://docs.cndt.ru/document/901892828> (дата обращения 10.01.2020)
44. Савко А.Д. Глинистые породы как сырьё для получения металлов // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. – 2016. – № 1. – С. 92–98.
45. Волконский Б.В., Макашев С.Д., Штейерт Н.П. Технологические физико-механические и физико-химические исследования цементных минералов. – Л.: Стройиздат [Ленингр. отд-ние], 1972. – 303 с.
46. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимические исследования углей в Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 96–100.

Поступила 23.05.2022 г.

Прошла рецензирование 27.06.2022 г.

Информация об авторах

Володина Д.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Таловская А.В., доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Девятова А.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей и региональной геологии Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Еделев А.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории эколого-экономического моделирования техногенных систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

UDC 504.3.054

ASSESSMENT OF DUST AND AEROSOL POLLUTION IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE CEMENT PLANT BASED ON THE STUDY OF SNOW COVER (NOVOSIBIRSK REGION)

Darya A. Volodina¹,
volodina.da2014@yandex.ru

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Anna Yu. Devyatova^{2,3},
devyatovaAY@ipgg.sbras.ru

Alexey V. Edelev³,
edelevAV@ipgg.sbras.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3, Academician Koptuyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research. Air pollution is an important and urgent problem of our time. One of the main sources of particulate matter is the construction industry. Solid particles enter the atmospheric air as a result of the extraction, transportation and grinding of raw materials, clinker firing, grinding and transportation of cement. In this regard, the environmental assessment of dust and aerosol pollution of atmospheric air in the areas where cement plants are located is relevant.

Purpose: to assess the state of atmospheric air in the vicinity of the cement plant in Iskitim based on the study of dust load, the levels of accumulation of chemical elements and the forms of their presence in the composition of solid particles settled in the snow cover.

Objects: the solid phase of the snow cover containing dust and aerosol particles deposited from the atmospheric air into the snow cover in the area of the cement plant.

Methods: atmogeochemical method, including the selection and preparation of snow cover samples to obtain a solid phase of snow cover; analytical methods for studying samples: inductively coupled plasma mass spectrometry, instrumental neutron activation analysis, X-ray phase method, scanning electron microscopy; methods of statistical processing of results in the software «STATISTICA 8»; ecological and geochemical analysis of data by calculating indicators – dust load (P_n), concentration coefficient (K_c), total pollution index (Z_{spz}), cartographic presentation of the results in Surfer 11 and CorelDraw X7 software, raw materials for cement production (limestone, clay, slag, pyrite cinders).

Results. The levels of dust load in the vicinity of the cement plant are in a wide range (from 57 to 1028 mg/(m²·day) with an average value of 318 and a background of 7 mg/(m²·day). Dust pollution ranges from low to very high level. The levels of dust load decrease from 436 to 78 mg/(m²·day) in the north-north-west direction at a distance of 0,6 to 2,8 km from the plant. The near zone of influence (up to 500 m) – 1028 mg/(m²·day), as well as in the area of the open pit where the main raw materials are mined – 932 mg/(m²·day). The mineral composition of the solid phase of the snow cover is represented by minerals raw materials – calcite (CaCO₃) – 82,1 %, quartz (SiO₂) – 4,4 %, magnesite (MgCO₃) – 7,6 %, cement clinker minerals – brownmillerite (Ca₂(Al, Fe)₂O₅) and hatrurite (Ca₃(SiO₄)O) – 6,4 and 26,6 %, respectively. In the solid phase of the snow cover, microparticles of calcium and iron oxides, as well as microparticles of aluminosilicate composition with sizes from 2,7 to 64,5 μm, were isolated. The technogenic geochemical specialization of the solid phase of the snow cover is characterized by elevated levels of accumulation of Ca (14–23 times higher than the background), Zn, Sr, Sb, Tb, Yb, La, Sm, U (2–7 times higher than the background), which form a low pollution level. The distribution of Ca and dust load with distance from the boundaries of the plant in the northwest direction are similar. The maximum levels of dust load (1028 mg/(m²·day)) and Ca accumulation (24 %) in the solid phase of the snow cover were determined at a distance of 0,5 km, and as the distance from the plant boundaries (from 0,5 to 2,8 km), there is a decrease in the level of dust load by an average of 7 to 13 times (140–78 mg/(m²·day)) and Ca accumulation by 1,5 times (16–17 %). Trace elements-indicators (Cr, Sb, Zn), which are defined in the reference book of the best available technologies as specific in the composition of cement production emissions, in the solid phase of the snow cover exceed background levels from 2 to 7 times. The solid phase of the snow cover is characterized by geochemical associations Zn-Cr, As-Ta, Yb-U-Sb, Tb-Ba, Th-Na, Fe-La. There are correlations between trace elements-indicators (Ca, Ba, Cr, As, Fe, Sb, Zn), characteristic of cement production emissions, with rare earth and radioactive (U, Th) chemical elements. This fact may indicate a single source of these elements (with positive correlations), and also reflect the difference in the composition of corrective additives for cement production and different forms of presence of chemical elements in the composition of solid particles in the vicinity of the cement plant (with negative correlations). The identified geochemical associations with a high degree of probability reflect the geochemical specialization of the raw materials used, corrective and mineral technological additives for cement production.

Key words:

dust aerosols, cement industry, dust load, snow cover, trace elements, air pollution.

The authors appreciate the performance of laboratory and analytical works for determining chemical composition of snow cover solid phase samples by Aleksandr F. Sudyko, Larisa V. Bogutskaya, analysts of nuclear-geochemical laboratory at TPU, Nina V. Fedyunina, director of chemical and analytical center «Plasma» (Tomsk), assistance in studying microparticles on scanning electronic microscope by Sergey S. Ilyenok, senior lecture of Department of Geology at TPU, Cand. Sc., assistance in determining mineral composition of snow cover solid phase samples by Bulat R. Soktoev, associate professor of Department of Geology at TPU, Cand. Sc.

Sampling and preparation of snow cover samples were carried out with partial financial support of the basic project of Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 0266-2022-0028.

The research was carried out at the National Research Tomsk Polytechnic University as part of the program to increase the competitiveness of TPU among the world's leading research centers.

REFERENCES

- GOST R 56828.47-2019. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Proizvodstvo tsementa. Vybory markernykh pokazateley dlya vybrosov v atmosferu ot promyshlennykh istochnikov* [State Standard R 56828.47-2019. The best available technologies. Cement production. Selection of marker indicators for atmospheric emissions from industrial sources]. Moscow, StandardInform Publ., 2019. 32 p.
- Silosy kak tsementnaya bomba* [Silos like a cement bomb]. 2022. Available at: <https://sovpym.ru/blogs/filtr-silosa-cementa/> (accessed 22 June 2022).
- Kosorukova O.E., Krylova O.K. Environmental pollution from the cement industry. *Actual problems of aviation and astronautics*, 2019, vol. 2, pp. 495–496. In Rus.
- Morozov S.V., Raputa V.F., Kokovkin V.V. Evaluation of precipitation of organic and inorganic impurities in the vicinity of a cement plant. *INTEREXPO GEO-Siberia*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 113–120. In Rus.
- Shcherbatov A.F., Raputa V.F., Turbinsky V.V., Khmelev V.A., Olkin S.E., Yaroslavtseva T.V. Monitoring of snow cover pollution in the area of the Iskitim cement plant. *Distant. probe methods. Earth and photograms, environmental monitoring environment, geocological (Interexpo GEO-Siberia)*, 2014, vol. 1, pp. 163–168. In Rus.
- Lezhenin A.A., Yaroslavtsev T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of the snow cover based on ground and satellite information. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology. Series: Technics and technologies*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 950–959. In Rus.
- Shcherbatov A.F., Raputa V.F., Turbinsky V.V., Yaroslavtseva T.V. Evaluation of air pollution by dust according to snow survey data based on the reconstruction of fallout fields. *Health risk analysis*, 2014, no. 2, pp. 42–47. In Rus.
- Muhammed Siddiq Abdul Samad, Prem Mohan, Varghese G.K., Irfan Khursheed Shah, Babu J. Alappat. Environmental forensic investigation of the air pollution from a cement manufacturing unit. *Environmental Forensics*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 37–47.
- Eom S.Y., Cho E.B., Oh M.K. Increased incidence of respiratory tract cancers in people living near Portland cement plants in Korea. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 2017, vol. 90, pp. 859–864.
- Zeb K., Ali Y., Khan M.W. Factors influencing environment and human health by cement industry: Pakistan a case in point. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2019, vol. 30, no. 4, pp. 751–767.
- Fayomi G.U., Mini S.E., Fayomi O.S., Ayoola A.A. Perspectives on environmental CO₂ emission and energy factor in Cement Industry. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 331, pp. 1–7.
- Nidheesh P.V., Suresh Kumar M. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 231, pp. 856–871.
- Bertoldi M., Borgini A., Tittarelli A., Fattore E., Cau A., Fanelli R., Crosignani P. Health effects for the population living near a cement plant: an epidemiological assessment. *Environment International*, 2012, no. 41, pp. 1–7.
- Kameswaran S., Gunavathi Y., Gopi Krishna P. Dust pollution and its influence on vegetation – a critical analysis. *Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences*, 2019, vol. 5 (1), pp. 341–363.
- Ines Terwayet Bayouli, Houssein Terwayet Bayouli, Aronne Dell'Oca, Erik Meers, Jian Sun. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: Eco-based environmental assessment. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 125, pp. 1–15.
- Al faifi T., El-Shabasy A. Effect of heavy metals in the cement dust pollution on morphological and anatomical characteristics of *Cenchrus ciliaris* L. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 28, pp. 1069–1079.
- Ying Hong Liu, Xue Song Wang, Ying Hai Guo, Ying Ming Mao, Hao Li. Association of black carbon with heavy metals and magnetic properties in soils adjacent to a cement plant, Xuzhou (China). *Journal of Applied Geophysics*, 2019, vol. 170, pp. 1–8.
- Drack J.M.E., Vazquez D.P. Morphological response of a cactus to cement dust pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 148, pp. 571–577.
- Olatunbosun N.O., Sawa B.A., Jibrin A., Ilori A.E. Assessment of effect of cement dust from cement factory on elemental properties of some cultivated crops, Obajana, Kogi State, Nigeria. *J. Geogr. Environ. Earth. Sci. Int.*, 2020, vol. 24 (1), pp. 63–69.
- Lamare R.E., Singh O.P. Effect of cement dust on soil physico-chemical properties around cement plants in Jaintia Hills, Meghalaya. *Environ. Eng. Res.*, 2020, vol. 25 (3), pp. 409–417.
- Paoli L., Winkler Al., Guttova A., Sagnotti L., Grassi A., Lackovicova A., Senko D., Loppi S. Magnetic properties and element concentrations in lichens exposed to airborne pollutants released during cement production. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, vol. 24, pp. 12063–12080.
- Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. *Ecological Indicators*, 2019, no. 104, pp. 24–31.
- Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Monitoring of soil pollution in the area affected by OAO Novoroscement. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. 10, pp. 369–376. In Rus.
- Turbina E.S. Estimation of dust pollution of atmospheric air by the Teplozersky cement plant using the snow survey method. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom Aleichem*, 2016, no. 3, pp. 58–65. In Rus.
- Kozłowski R., Szwed M., Jarzyna K. Analysis of snow pollutants in an industrial urban zone near the city of Ostrowiec Swietokrzyski. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2018, vol. 25 (1), pp. 7–18.
- Investitsionny passport g. Iskitim* [Investment passport of Iskitim town]. 2018. Available at: https://www.nso.ru/sites/test.new.nso.ru/wodby_files/files/wiki/2014/01/iskitim.pdf (accessed 17 December 2019).
- Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu»* [State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018»]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Research and production enterprise «Cadastre», 2019. 844 p.
- Gosudarstvenny doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Novosibirskoy oblasti v 2021 godu* [State report on the state and environmental protection of the Novosibirsk Region in 2021]. Novosibirsk, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Novosibirsk Region, 2022. 180 p.
- Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the geochemical assessment of pollution of urban areas with

- chemical elements]. Moscow, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements Publ., 1982. 111 p.
30. RD 52.04.186-89 Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Guidelines for the control of air pollution]. Moscow, Goskomgidromet Publ., 1991. 693 p.
 31. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the territory of the northeastern zone of influence of the Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Atmospheric and ocean optics*, 2014, vol. 27, no. 06, pp. 491–495. In Rus.
 32. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Shakhova T.S., Filimonenko E.A. Assessment of aerotechnogenic pollution in the vicinity of coal and oil boilers according to the state of the snow cover (on the example of the Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 116–130. In Rus.
 33. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskii monitoring* [Geoecological monitoring]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 276 p.
 34. Yazikov E.G. Development of a methodology for a comprehensive ecological and geochemical assessment of the state of the natural environment (on the example of objects in the south of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 304, no. 1, pp. 325–336.
 35. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Achkasov A.I., Sargsyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 36. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow. *Bulletin of the Moscow University*, 2012, vol. 5 Geography, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
 37. Shatilov A.Yu. *Veschestvenny sostav i geokhimicheskaya kharakteristika atmosferykh vipadeniy na territorii Obского basseyna*. Dis. Kand. nauk [Material composition and geochemical characteristics of atmospheric precipitation on the territory of the Ob basin. Cand. Diss.]. Tomsk, 2001. 205 p.
 38. Yazikov E.G. *Ekogeokhimiya urbanizirovannykh territoriy yuga Zapadnoy Sibiri*. Diss. Dokt. nauk. [Ecogeochemistry of urbanized territories in the south of Western Siberia. Dr. Diss.]. Tomsk, 2006. 423 p.
 39. Mikhaltchuk A.A., Yazikov E.G. *Mnogomerny statisticheskiy analiz ekologo-geokhimicheskikh izmereniy*. Ch. II. Kompyuterny praktikum [Multivariate statistical analysis of ecological and geochemical measurements. P. II. Computer workshop]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. 150 p.
 40. Talovskaya A.V., Volodina D.A., Yazikov E.G. Macroelement and mineral-phase composition of dust in the impact zone of a cement plant according to the study of snow cover (Kemerovo region). *Chemistry for Sustainable Development*, 2019, no. 2, pp. 201–210. In Rus.
 41. Stark J., Wicht B. *Tsement i izvest* [Cement and lime]. Kyiv, F.A. Finger Institute of Building Materials of Bauhaus University Publ. House, 2008. 480 p.
 42. *Informatsionno-tekhnicheskiiy spravochnik po nailuchshim dostupnykh tekhnologiyam. Proizvodstvo tsementa* [Information and technical guide to the best available technologies. Cement production]. Moscow, NDT Bureau, 2015. 305 p.
 43. *Pismo ot 18.09.2003 g. N NK-5830/4 Ob investitsiyakh v razvitie tsementnoy promyshlennosti i ob utilizatsii pri proizvodstve tsementa otkhodov drugikh otrasley ekonomiki, v tom chisle bytovykh* [Letter, 18.09.2003 N NK-5830/4. On investments into development of cement industry and on utilization of wastes of other economic sectors, including domestic wastes, when producing cement]. 2003. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901892828> (accessed 10 January 2020)
 44. Savko A.D. Clay rocks as a raw material for obtaining metals. *Bulletin of VSU, Series Geology*, 2016, no. 1, pp. 92–98. In Rus.
 45. Volkonsky B.V., Makashev S.D., Shteiert N.P. *Tehnologicheskije fiziko-mekhanicheskie i fiziko-khimicheskie issledovaniya tsementnykh mineralov* [Technological physical-mechanical and physical-chemical studies of cement minerals]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1972. 303 p.
 46. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. Geochemical studies of coals in Siberia. *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 96–100. In Rus.

Received: 23 May 2022.
Reviewed: 27 June 2022.

Information about the authors

Darya A. Volodina, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna V. Talovskaya, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna Yu. Devyatova, Cand. Sc., associate professor, Novosibirsk State University; senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexey V. Eddelev, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.