

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.46 (571.53)

РЕГИОНАЛЬНЫЙ И ЛОКАЛЬНЫЙ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПЕРЕНОСЫ ВЕЩЕСТВ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В СНЕГОВОМ ПОКРОВЕ

© 2020 г. А. В. Захарченко^{1,*}, А. А. Тигеев¹, О. А. Пасько^{2,**}, Л. Г. Колесниченко^{3,***},
Д. В. Московченко^{1,4,****}

¹ Тюменский научный центр СО РАН, ИПОС, ул. Малыгина, 86, Тюмень, 625026 Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия

³ Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

⁴ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003 Россия

*E-mail: avzakh@gmail.com

**E-mail: oap@tpu.ru

***E-mail: klg77777@mail.ru

****E-mail: moskovchenko1965@gmail.com

Поступила в редакцию 06.07.2020 г.

После доработки 06.07.2020 г.

Принята к публикации 06.07.2020 г.

Перемещение химических веществ в географическом пространстве — актуальный аспект научных изысканий. Цель работы — выявление геохимического трансграничного, регионального и локального переноса аэрозолей, депонированных в снеговом покрове территорий при разной степени удаленности от промышленного центра. Объектом исследования является снеговой покров Томской области. В фильтрате талого снега химико-аналитическими методами определены: pH, концентрации нитратного и аммиачного азота, фосфора, калия, кальция, магния, натрия, хлора (мг/л), а в твердом остатке — микроэлементы (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn, Cr, Ni) с использованием атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Установлено равномерное распределение средней мощности снега на изученной территории. Показана ее годовая изменчивость. Вблизи промышленной зоны Томской агломерации отмечены повышенные значения NO_3^- , NH_4^+ , щелочных и щелочно-земельных элементов. Установлена взаимосвязь между содержанием в талой воде Ca и Cl, что указывает на эрозионно-почвенный источник Cl. В лесу мощность снега, содержание пыли, NH_4 , P_2O_5 , Mg в талой воде достоверно выше, чем на открытой местности. Содержание сидерофильных и литофильных микроэлементов в твердом осадке, возрастает вблизи промышленной зоны Томской агломерации и убывает с удалением от нее. В отдельно отстоящих точках (пос. Баткат, Комаровские болота), удаленных более 60 км от Сибирского химического комбината (СХК), обнаружено повышенное содержание химических элементов, схожее с загрязнением от СХК. Выдвинута объясняющая гипотеза о переносе ветрами загрязняющих веществ от периферии области пониженного давления к центру циклона при его подходе к городу с запада.

Ключевые слова: твердые аэрозоли, снеговой покров, микроэлементы, поллютанты, циклонический перенос

DOI: 10.31857/S0869780920060119

ВВЕДЕНИЕ

В глобальном масштабе наблюдаются три “шапки” повышенной концентрации загрязняющих веществ в атмосфере: промышленные районы Северной Америки, большая часть европейского континента и восточная Азия [12]. Западная Сибирь далеко отстоит от них. К региональным центрам негативного влияния на южную часть Западной Сибири относятся города Усть-Каменогорск и Риддер, расположенные в Восточно-Казахстанской области [16]. Изучение снегового

фильтрата и пыли в Западного Алтая выявило геохимическую аномалию в содержании сульфатов, азотистых веществ, элементов полиметаллических руд, поступающих из Казахстана. Томск-Северская агломерация расположена в центре Евразии на равном удалении от промышленных центров Кемеровской, Новосибирской, Омской и Тюменской областей. Однако, на пограничных с этими областями территориях можно ожидать эффекты регионального переноса загрязняющих веществ антропогенной природы.

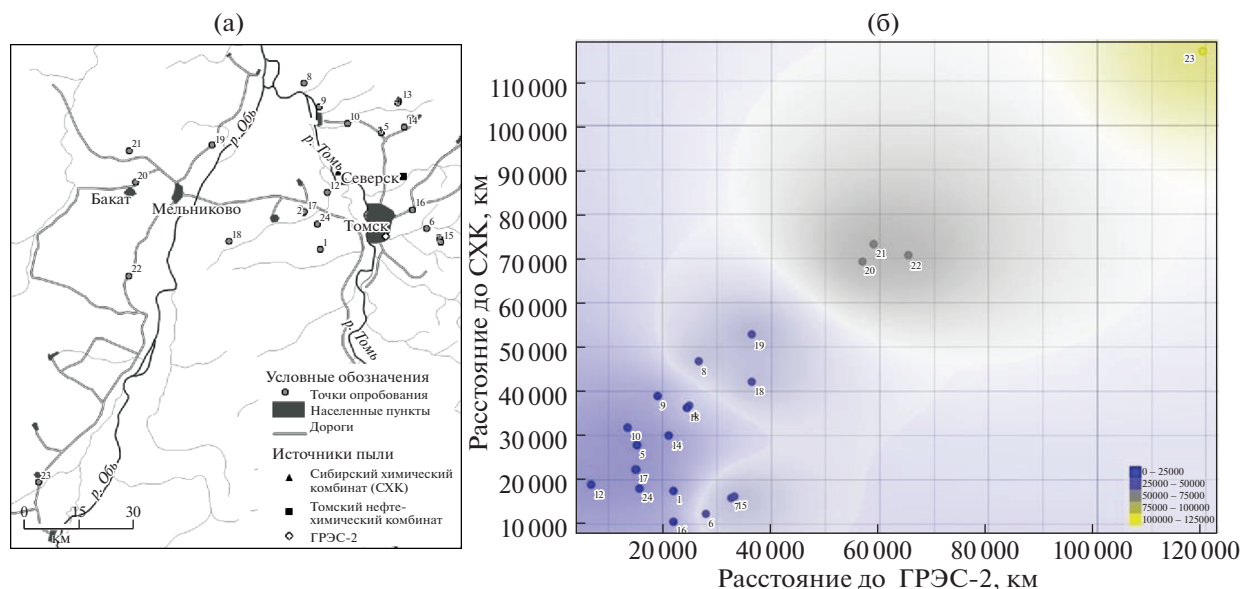


Рис. 1. а — Расположение точек мониторинга (М: 1:1 200000), б — их удаленность (м) от источников выбросов загрязняющих веществ — ГРЭС-2 и Сибирского химического комбината.

Формирование геохимических аномалий снегового покрова обусловлено горизонтальными потоками вещества естественной и антропогенной природы [5], которое накладывается на широтную изменчивость [10]. Снег, как часть нивально-гляциальной системы и звена круговорота воды, влияет на динамику экосистем [11], что проявляется в почвообразовательных процессах, состоянии растительности и животного мира, и поэтому является объектом экосистемного мониторинга. Актуальность работы обусловлена не столько выделением проблемных территорий, сколько выявлением закономерностей их транслокации на значительном удалении от рассеянных источников [28, 33] путем анализа пространственного распределения поллютантов в снеге. Их поступление происходит в Томской области как из местных источников, так и из сопредельных регионов. Кожевниковский, Бакcharский, Парабельский районы примыкают к Новосибирской области, Зырянский район — Кемеровской области [21]. Метеорологические данные указывают на присутствие барического градиента, вызывающего развитие стойкого западного переноса воздушных масс. Циклональные циркуляции атмосферного воздуха могут быть причиной как глобального, так и регионального перераспределения загрязняющих веществ в снеговом покрове.

Цель работы — выявление пространственных особенностей геохимического глобального, регионального и локального распределения некоторых растворенных веществ и твердых аэрозолей, депонированных в снеговом покрове территорий

в разной степени удаленности от промышленного центра с использованием ГИС-технологий и статистического анализа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — снеговой покров фоновой и импактной территорий Томск-Северской агломерации (рис. 1). Точки наблюдения расположены вокруг промышленной агломерации, наиболее крупными объектами которой являются: Сибирский химический комбинат (СХК), Томский нефтехимический комбинат (ТНХК), ГРЭС-2 в г. Томске. Кроме них в городе и окрестностях расположены предприятия строительной промышленности (кирпичный и железобетонный заводы), а также пищевой, фармацевтической, металлообрабатывающей и других отраслей.

В импактном методе исследование проводят вокруг объектов, очевидно воздействующих на химический состав снега [9, 13, 15, 20, 22–24, 27]. В маршрутном методе за основу берут геохимическую закономерность, например, природную зональность климата депонирования в снегу химических веществ [9]. При отсутствии видимых границ импактного воздействия и априорных географических закономерностей применяют вероятностно-статистический подход, который становится единственно приемлемым при изучении городской среды или природных экосистем. В этом случае территорию делят на условные квадраты, а выбор одного из них для наблюдения проводят случайным способом. Этот подход ис-

пользован при определении положения точек наблюдения.

В ходе мониторинга снегового покрова Томской области проводили пробоотбор в течение шести лет. Исследовали состав снега на мониторинговых площадках, заложенных на различном расстоянии от источников загрязнения (см. рис. 1). Выбор их местоположения проводили в зависимости от доступности — вблизи автомобильных дорог или на удалении не более 3–5 км от дороги. Для оценки способности лесов задерживать пыль [8] точки отбора проб снега в большинстве случаев располагали парно — в лесу и на близлежащем сельскохозяйственном поле. В первый год наблюдения было подготовлено 11 мониторинговых площадок (0.5 га), затем их число увеличили до 18, на следующий год — до 23, соответственно, длительность наблюдений в период с 1995 г. по 2000 г. на площадках составила 3–6 лет.

Отбор проб и химический анализ снеговых вод проведен по общепринятым методикам [6, 17] в марте в течение 10 дней. Среднее значение мощности снега определено по результатам не менее, чем 20 промеров, сделанных через 5 м на радиальных маршрутах от точки опробования. Отбор проб снега проведен стандартным снегомером на всю глубину слоя снега до подстилки, после чего нижние 5 см снега, содержащие примеси почвы и напочвенной подстилки, удаляли и определяли его плотность. Для оценки содержания пыли составляли сборную пробу из 3–5 образцов в зависимости от мощности слоя снега.

Таяние снега проходило в лабораторных условиях при комнатной температуре. Фильтрацию осуществляли с использованием вакуумного насоса сквозь фильтр “синяя лента”, затем фильтры высушивали в сушильном шкафу при 105°C. В снеговой воде определяли: рН, концентрации нитратного и аммиачного азота, фосфора, калия, кальция, магния, натрия, хлора (мг/л) по стандартным методикам [2]. В пылевом осадке при использовании атомно-адсорбционного спектрофотометра определено валовое содержание никеля, кобальта, свинца, меди, цинка, марганца, хрома и кадмия.

Поток вещества пыли на снеговую поверхность определялся по формуле:

$$P = \frac{Pc}{S \cdot T},$$

где P — поток вещества на единицу поверхности в единицу времени (мг/(м²сут)), Pc — масса пыли, S — суммарная площадь отбора проб, T — временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. Для Томской области длительность периода залегания снега составляет 175–180 суток, а усредненное значение T — 178 суток [24].

Для анализа пространственного распределения содержания микроэлементов использовали геоинформационную систему QGIS, с помощью которой результаты кластерного анализа наносили на карту или космические снимки. Измеряли расстояние от каждой точки наблюдения до СХК и ГРЭС-2, которые рассматривали в качестве источников воздействия. Для оценки влияния факторов поступления загрязняющих веществ в снег использовали пакеты программ Statistica, Orange, Python.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зависимости от масштаба выделяют три вида наблюдений: глобальный, региональный и локальный (импактный), которые в геохимическом плане реализуются в каждой географической точке, что выражается во временных лагах между событием и появлением его последствий на территории. Например, извержение вулкана Пинатубо, который в 1991 г. закрыл непроницаемой завесой участок атмосферы площадью 125000 км² вызвал похолодание на юге России в 1993 г. [22]. Извержение вулканов в 2010–2011 гг. в Исландии привело к росту содержания ртути в снеговом покрове на метеостанции в пос. Андарма [31]. Региональный перенос накладывается на глобальный, что может существенно влиять на образование геохимических аномалий.

По результатам многолетних замеров средняя мощность снегового покрова в изученном районе составляет 56.4 ± 2.7 см и распределена равномерно по изученной территории с коэффициентом варьирования 25.9% (табл. 1).

По некоторым показателям (мощность снега H , рН) вариабельность средняя, тогда как по другим — содержание пыли, P_2O_5 , Mg, N_NO_3 высокое (более 100%). Средние значения мощности снега в лесу больше, чем на пашне, что подтверждает тест Mann-Whitney при $p < 0.05$. Средняя плотность снега 0.188 ± 0.009 г/см³. Реакция снеговых вод изменяется в пределах — от 5.6 до 6.6 усл. ед. рН; ее среднее значение составляет 6.04 ± 0.13 , что согласуется с данными других авторов [3] — 5.9 ед. рН для снега 30 км зоны СХК. В случае интенсивных выбросов сернистых и азотистых соединений наблюдается подкисление снеготалых вод, как это отмечено при трансграничном переносе загрязняющих вещества из Казахстана в Алтайский край и Горно-Алтайск [16].

Пылевая нагрузка в среднем составляет 8.5 ± 3.6 мг/(м² сут), что близко к фоновым значениям для Томской области — 7 мг/(м² сут) [20, 21]. Среднее содержание твердых нерастворимых частиц в талой снеговой воде составляет 6.8 ± 1.2 мг/л. Концентрации пыли выше доверительного интервала среднего отмечены как на

Таблица 1. Статистические характеристики среднее (Среднее), доверительный интервал при $p < 0.05$ (Дов. инт.), медиана, стандартное отклонение (Ст. откл.), коэффициент вариации (Коеф. вар.), среднее значение для точек, отнесенных к фоновым (Средн. фон), для показателей: мощность снегового покрова и pH, химический состав снеготалых вод, химический состав микроэлементов пыли

Характеристики	N	Среднее	Дов. инт.	Медиана	Ст. откл.	Коеф. вар., %	Средн. фон
Мощность, см	114	56.44	2.69	54.95	14.63	25.93	55
pH	114	6.05	0.13	6.10	0.73	12.07	6
Содержание в снеготалых водах, мг/л							
Пыль	114	7.08	1.31	4.90	7.14	100.86	4.1
N-NO_3^-	114	0.14	0.03	0.05	0.18	132.23	0.12
NH_4^+	103	0.42	0.05	0.35	0.23	56.16	0.38
P_2O_5	103	0.08	0.02	0.06	0.09	106.70	0.06
K_2O	114	1.06	0.17	1.00	0.90	84.75	1.02
Ca^{2+}	114	7.34	1.13	5.41	6.18	84.15	6.75
Mg^{2+}	114	2.48	0.75	1.22	4.07	164.00	2.01
Na^+	86	1.03	0.13	1.00	0.62	60.45	1.09
Cl^-	86	7.46	1.09	7.00	5.15	69.03	7.17
Содержание микроэлементов в пыли, мкг/л							
Ni	77	2.68	1.48	0.33	2.26	55.28	1.74
Co	76	0.42	0.35	0.08	0.29	84.29	0.23
Pb	76	1.42	1.71	0.38	0.52	120.34	1.37
Cu	77	7.30	3.80	0.85	6.42	52.01	6.15
Zn	77	26.74	44.37	9.91	15.80	165.90	24.39
Mn	77	34.16	32.58	7.28	19.98	95.37	16.15
Cr	77	5.60	5.94	1.33	4.09	106.15	3.73
Cd	77	0.05	0.04	0.01	0.04	76.77	0.05

точках отбора проб вблизи промышленной зоны (см. рис. 1 точки 5, 6, 10, 12, 16), так и на удалении от источников выброса пыли (см. рис. 1 точки 4, 21, 22).

Известно, что на фоновых участках в Арктике среднее содержание частиц пыли в поверхностном слое снежного покрова составляет 2.74–2.91 мг/л [24, 25], что можно считать естественным глобальным атмосферным фоном. Региональный фон зависит от географической широты [9].

Отмечается значительная вариабельность содержания пыли не только в пространстве, но и во времени. Выделяется 1997 г., когда мощность снежного покрова была максимальной (78.2 ± 4.7 см), а содержание пыли – минимальным (0.40 ± 0.13 мг/л) (рис. 2). Рост мощности слоя снега привел к снижению концентрации пыли за счет разбавления большим объемом снега. Следующий 1998 г. так же выделился, но уже по увеличению потока пыли на поверхность снега. Такая вариабельность объясняется мозаичной горизонтальной миграцией атмосферных аэрозолей в

зимний период, их региональным и глобальным переносом. Например, локальные различия могут определяться лесистостью местности. Сравнение двух выборок по тесту Mann-Whitney при $p < 0.05$ в лесу и на сельскохозяйственном поле показало, что количество пыли в снеговой воде больше в лесу.

Содержание NO_3^- в снеготалой воде отражает загрязнение атмосферы при сгорании жидких форм топлива. Известно [7], что распределение сернистых и азотистых соединений в снеговом покрове северной части России происходит неравномерно, особенно в Мурманской и Архангельской областях, Карелии и Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО). В фоновых точках Томской области содержание NO_3^- выше (0.12 мг/л), чем на севере Сибири, например, для месторождений Ямала характерен интервал 0.01–0.37 мг/л [9].

Среднее содержание NH_4^+ в снеговом покрове Томской области исследования равно 0.41 ± 0.04 мг/л, что согласуется с данными [14] по

Тюменской области, ХМАО, но существенно ниже, чем в Прибайкалье и центре Восточно-Европейской равнины. Фоновое содержание в точках наблюдения Томской области определено как 0.36 ± 0.04 мг/л. Содержание NO_3^- , NH_4^+ повышено относительно фона вблизи промышленной зоны. Сравнение содержания NH_4^+ в лесу и пашне выявило достоверные различия, и в лесу оно выше.

Среднее содержание P_2O_5 в талой снеговой воде близко 0.08 ± 0.2 мг/л к фону (0.07 ± 0.02) мг/л. Можно предположить, что содержание фосфатов в снеготалой воде на пашне отличается от таковой в лесу. Тест Mann-Whitney при $p < 0.05$ подтвердил, что различия достоверны, но содержание фосфатов в лесу больше, чем на пашне.

Содержание щелочных металлов равномерно распределено по территории, колеблясь около средних значений. Можно ожидать, что они связаны с Cl^- . Хлорид-ион отражает загрязнение снега легкорастворимыми солями. Однако, коэффициент корреляции между щелочными металлами и хлорид-ионом близок к нулю. Среднее содержание Cl^- по результатам исследования составляет 7.46 ± 1.1 мг/л, что в 7 раз больше натрий-иона — 1.03 ± 0.13 мг/л. Концентрации Cl^- в точках наблюдения меняются относительно друг друга незначительно. Для ХМАО среднее содержание хлоридов в снегу существенно ниже — 3.4 мг/л [14], оно возрастает в направлении с запада на восток. Аномально высокое содержание хлорид-иона отмечено в 1997–1998 гг., позже оно резко пошло на убыль до 1.3 ± 0.5 мг/л.

Среднее содержание кальция в снегу составляет 7.3 ± 1.1 мг/л. Отмечается высокое значение коэффициента Спирмена между содержанием Ca^{2+} и Cl^- ($r = 0.75$ при $p < 0.05$). Связь между ними имеет логарифмическую зависимость:

$$\text{Cl} = 7.2\text{Lg}(\text{Ca}) + 3.16 \quad (r^2 = 0.5 \text{ при } p < 0.05).$$

Среднее содержание кальция и хлора в снеготалой воде примерно одинаково. Если исходить из химической формулы CaCl_2 и близких значений молекулярного веса элементов ($\text{Ca} - 40$, $\text{Cl} - 35.5$ у.е.), то молей хлора должно быть в 2 раза больше, определенного в снеготалой воде, а pH в ней сдвинуто в направлении подкисления, чего не наблюдается. Изучение поведения кальция на ледниках Восточного Тянь-Шаня выявило логарифмическую взаимосвязь между растворимостью кальция (DFP) и SO_4^{2-} [32]:

$$\text{DEF}^{\text{Ca}} = 8.76\text{Ln}(\text{SO}_4) + 5.69 \quad (r^2 = 0.3),$$

где DFP — растворимость кальция (%), SO_4^{2-} — содержание сульфат-иона (мг/л) в растворе.

Следовательно, конкуренцию хлорид-иону может составлять сульфат-ион. Получена после-

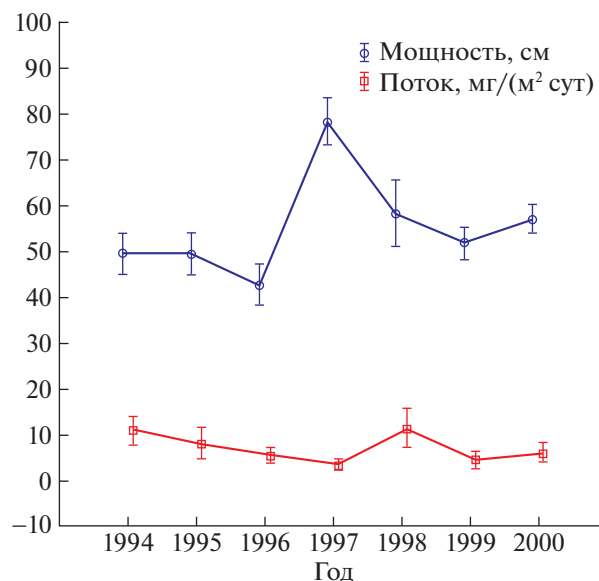


Рис. 2. Средняя мощность слоя снега (см), среднегодового поступления пыли (мг/(м²·сут)) в природные планшеты.

довательность растворимости при таянии снега: $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ [30, 32]. Из ряда основных катионов минеральной пыли Ca имеет наибольший DFP, объясняется его корреляцией с хлорид-ионом. Важным аспектом является нерастворимая часть Al , влияющая на растворимость кальция, но в этом случае взаимосвязь обратная — чем больше нерастворенного алюминия, тем меньше DFP кальция. Можно предположить, что часть кальция находится в карбонатах, и присутствие сильных кислот способствует его растворимости, а часть — в алюмосиликатах, и чем больше алюмосиликатов, тем меньше растворенного Ca^{2+} .

Содержание Mg^{2+} в снеготалой воде составляет 2.5 ± 0.7 мг/л. Растворимость Mg в большей степени объясняется именно присутствием алюминия. Оценка растворимости катионов, анионов проводилась в горах Китая на леднике Байшуй № 1 (юго-запад Китая) $\text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ [34, 35] и $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ — на леднике Ши на горе Килиан [30]. Наличие кальция и магния в аэрозолях связано с эрозийно-почвенным источником [4], что указывает на континентальное происхождение хлора. Между содержаниями кальция и магния, магния и хлора коэффициент корреляции Спирмена менее 0.3, что говорит о несущественности связи между ними. Тест Mann-Whitney при $p < 0.05$ показал, что локальные различия содержания магния в лесу больше, чем на пашне.

Вокруг промышленных источников формируется ареал рассеивания твердых аэрозолей, представляющих сухое их вымывание из атмосферы. Грубодисперсные фракции аэрозолей осаждаются в большинстве случаев (90%) в радиусе 7 км от источника загрязнения, распространяясь в радиусе 40 км [15]. Выпадение снега способствует как сухому, так и мокрому вымыванию загрязнителей атмосферы [20]. Среднее содержание свинца в снеговом покрове составляет 7.6 мг/л при фоновом значении 6.3 мг/л. В точках 20–22 отмечены концентрации свинца в снеговой пыли существенно выше фона. Точки 5 и 22 находятся в разных концах изученной территории, но вблизи магистралей с интенсивным движением транспорта, что объясняет повышенное содержание Pb.

В пос. Баткат располагается небольшая твердотопливная котельная, которая отопляет административные здания поселения. В углях, используемых как топливо, вряд ли можно ожидать высокое содержание свинца. Отмечается, что угли Сибири обогащены химическими элементами литофилами, сидерофилами (Cr, Ni, Co) и обеднены халькофилами (Cu, Pb, Zn, Cd и др.) [1]. Точки 20, 21 отстоят на 1.5–3 км от автотранспортных магистралей. Сухое вымывание свинца в снеговом покрове этих точек маловероятно. При изучении территории вокруг Норильского химического комбината показано, что выпадение Pb в снеговой покров имеет мозаичный характер [15]. Обнаружено высокое содержание свинца в снеговой воде на расстояниях, удаленных от Норильска на десятки и сотни километров. Исследования поступления свинца в снеговом покрове г. Тюмень показали, что он концентрируется в твердой фазе, содержание варьирует в широких пределах от 0 до 214 мкг/л [13]. Аномальные его концентрации локализованы.

Точка 21 (см. рис. 1) на мелиорированных Комаровских болотах является фоновой, так как удалена от автодорог и поселков. При сухом вымывании атмосферы пыль котельной в пос. Баткат не может распространяться до этого места, следовательно, обстоятельства ее загрязнения свинцом нуждаются в дополнительных исследованиях с учетом мокрого вымывания атмосферы. Среднее значение концентрации меди составляет 7.3 ± 0.8 мг/л. Загрязнение медью охватывает площадки, расположенные вокруг СХК, ТНХК (см. рис. 1, точки 5, 6, 9, 10, 13–16). Высокое значение коэффициента накопления (K_c) меди наблюдается на точке 20 (пос. Баткат). Поэтому Cu, как и Pb попала в район пос. Баткат не от угольной котельной, а каким-то другим путем. Аналогичная ситуация наблюдается с марганцем (34.2 ± 7.3 мг/л, фоновое – 18.4 мг/л). Повышенное содержание хрома отмечено в тех же точках, что Mn, но выделяется точка 7 с самым высоким содержанием Cr ($K_c = 3.8$), близкое значение K_c в точке 16. Анома-

лии содержания хрома в снеговом покрове связывают с литейным производством [18]. Загрязнение городского снега хромом в г. Благовещенск авторы связывают с трансграничным переносом из Китая, где для работы ТЭЦ используют уголь.

Для классификации точек наблюдения по характеру поступления химических элементов использован кластерный анализ k -средних (англ. k -means) (рис. 3). Намеренно задана разбивка на 3 кластера для упрощения на тот момент сложившейся ситуации с распределением микроэлементов на территории области. Евклидовы расстояния относительно центров многомерных кластеров усреднены по годам и нанесены на карту, кластеры выделены цветом.

Результаты классификации с использованием QGIS распределены по точкам с аппроксимацией цветом оценочных величин между точками. Синим цветом показаны точки схожего химического состава, которые группируются на северо-востоке и юго-востоке от СХК (888) и вблизи от ТНХК (см. рис. 3, точки 10, 3, 5, 14, 4, 16) и значительно удаленные на 70 км от СХК (точки 20, 21). Загрязнение в точке 20 (пос. Баткат) и точке 21 (Комаровские болота) можно объяснить гипотезой внутри циклонального переноса обратно направлению его движению. Зеленым цветом обозначены точки, тяготеющие к городской агломерации с центром 999 (ГРЭС-2). Красным цветом выделены точки, имеющие фоновое содержание химических веществ.

При движении с запада на восток на подходе к Томску циклоны вызывают трансграничный перенос поллютантов, формируя воздушные потоки юго-западного направления из Новосибирской области и даже Казахстана (см. рис. 3, желтая стрелка). У вихря имеется вторая часть спирали циклона, которая, подходя к городской агломерации, захватывает поллютанты и направляет их против часовой стрелки, заставляя двигаться к центру циклона в западном направлении, обратно его общему движению.

Циклональные процессы способствуют дальнейшему переносу атмосферной пыли на расстояние более 60 км (см. рис. 3, бурая стрелка). Зимние циклоны, как правило, имеют диаметр 150–300 км, так что на половине диаметра (70–150 км) в западном и северо-западном направлениях формируется зона мокрого вымывания поллютантов из атмосферы, захваченных над городской агломерацией. Снегопады, образующиеся в области пониженного давления, эффективно вымывают аэрозоли из атмосферы. Наиболее интенсивное выпадение осадков происходит в периферийной части циклональной облачности в районе пос. Баткат и Комаровских болот. При скорости ветра в циклональных явлениях 25–50 км/ч время перемещения аэрозолей от города к месту выпа-

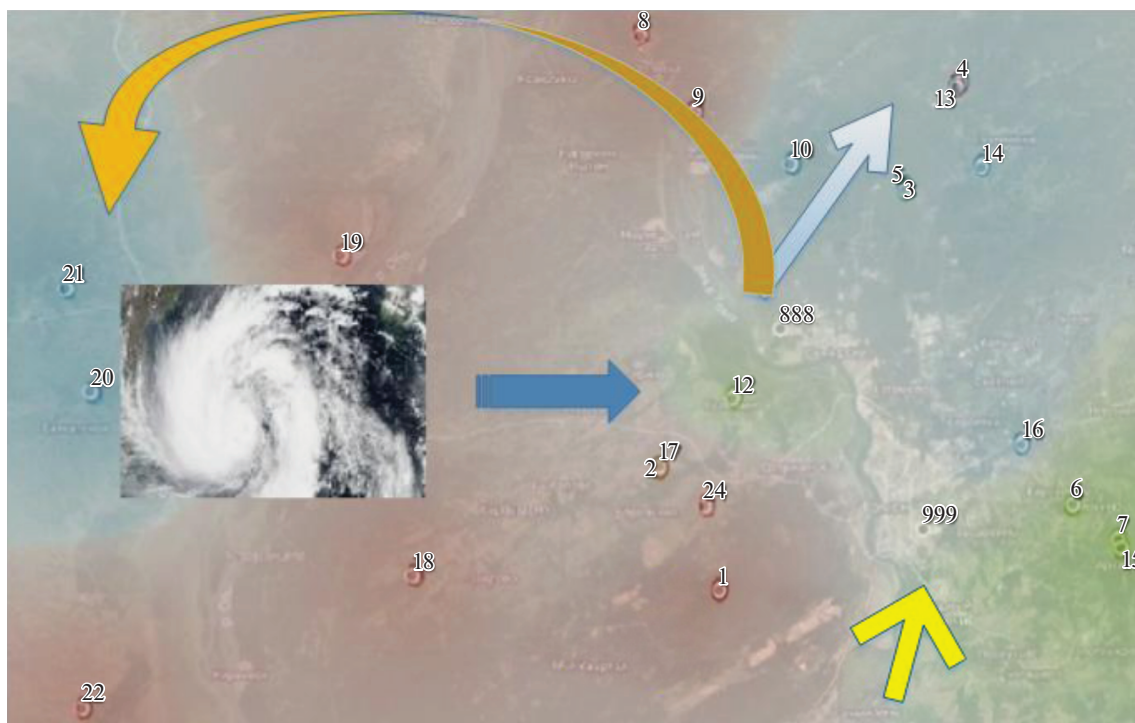


Рис. 3. Результаты кластерного анализа (цветовые оттенки) распределения загрязняющих веществ на территории и схема движения циклонического барического поля (масштаб 1:620 000). Объяснения в тексте.

дения осадков составляет 1–3 ч. Затем циклоническое барическое поле проходит городскую агломерацию и захватывает уже чистые от аэрозолей атмосферные области, поэтому между зоной мокрого осаждения и городской агломерацией располагается слабо загрязненный пылью снеговой покров.

В 1993 г. в результате аварии на Сибирском химическом комбинате произошел выброс радиоактивных веществ в атмосферу при движении облака на северо-восток в направлении с. Георгиевка и с. Черная речка (см. рис. 3, градиентная голубая стрелка) в соответствии с метеорологической обстановкой на тот момент. Если бы на момент аварии преобладало циклоническое барическое поле, то можно ожидать радиационное загрязнение территории в соответствии с бурой стрелкой.

Антициклонические явления менее интенсивны. Их можно отнести к среднему по дальности переносу (25–30 км) от рассеянных источников пылеобразования. При длительном стоянии антициклона наблюдается повышенная загрязненность атмосферного воздуха по периферии антициклона. Локальный перенос загрязняющих веществ от импактного воздействия находится пределах 5–15 км в зависимости от розы ветров [29]. Несмотря на близкое расположение точек и сравнительно ровную местность, наблюдается

мозаичное выпадение пыли, что объясняется турбулентностью приземного слоя воздуха при его движении [19].

В лесном массиве происходит торможение воздуха, что вызывает выпадение аэрозолей [8]. В районе с. Георгиевка располагаются парные точки 4 и 13 (см. рис. 3). Точка 4 находится в лесу на водоразделе в 3 км от поселка, точка 13 – вблизи поселка на открытой местности на склоне (заброшенная пашня). Первая попадает в группу загрязненных, а вторая – чистых территорий. Несмотря на близкое расположение, точки ежегодно различаются по содержанию пыли, причем снег в точке 4 всегда содержит пыли больше (10.1 ± 3.2 мг/л), чем в точке 13 (3.0 ± 2.0 мг/л), хотя априори ожидалась обратное соотношение. В лесу содержание пыли, NH_4^+ , P_2O_5 , Mg^{2+} в снеготалых водах достоверно (при $p < 0.05$) больше относительно открытых пространств (пашни), аналогичные различия по содержанию микроэлементов в твердом остатке не установлены.

Гипотезу обратного циклонического переноса поллютантов можно проверить на других территориях. Например, вблизи г. Тюмень следует ожидать, что при подходе области пониженного давления к городу вихревые потоки захватывают атмосферные загрязнения городов Тобольск и Тюмень, направляя их на территорию между пос. Талица и границей Тюменской области, где

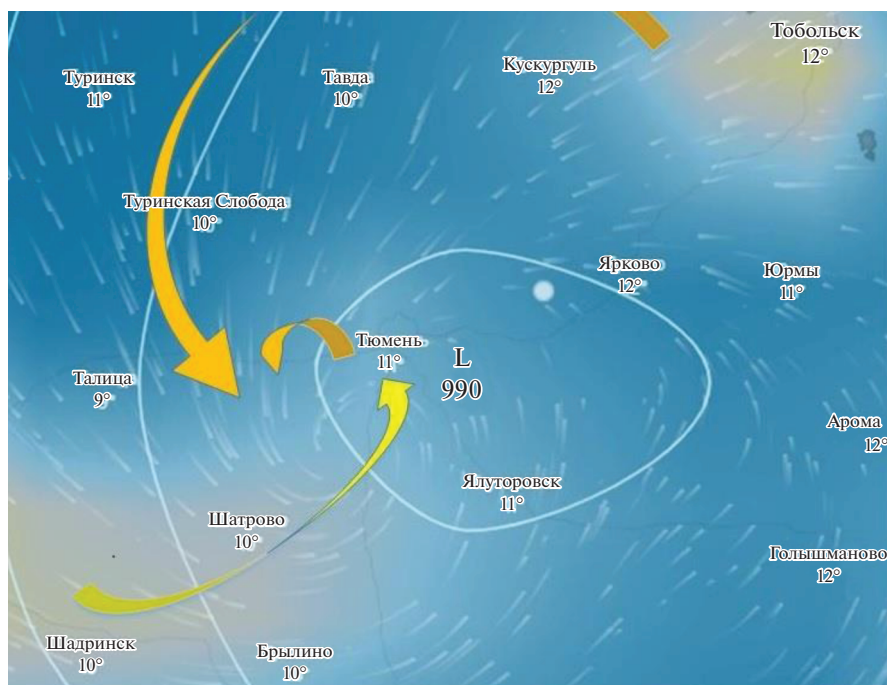


Рис. 4. Схема распределения NO_2 при подходе циклонической области пониженного давления к Тюмени. Штрихами показаны направление и скорость ветров; интенсивность бурого цвета отражает количество NO_2 ; желтая стрелка показывает направление паллютантов из Свердловской области; бурая стрелка — направление движения паллютантов из Тобольска и Тюмени (источник <https://www.windy.com/57.172/65.556?cams,no2,56.638,68.044,6,i:pressure,m:fgsahYq>).

следует ожидать повышенное содержание пыли в снегу. Сжигание жидкого топлива вызывает выделение в атмосферу NO_2 , что обычно сопровождается и выбросом аэрозолей. Общий характер движения NO_2 по территории показан буроватыми пятнами и стрелками (рис. 4). По этим локациям следует ожидать повышенное содержание пыли в снеговом покрове.

ВЫВОДЫ

1. Средняя мощность снегового покрова на изученной территории распределена равномерно, но характеризуется изменчивостью по годам.
2. По некоторым показателям (мощность снега, рН) вариабельность средняя, тогда как по другим (содержание пыли, P_2O_5 , Mg, NO_3) — высокая (>100%).
3. Сравнение снегового покрова в лесу и на пашне выявило, что в лесу относительно открытых мест больше мощность снега; содержание в снеговой воде пыли, NH_4^+ , P_2O_5 , Mg^{2+} достоверно выше, чем на пашне.
4. Содержание микроэлементов возрастает вблизи промышленной зоны Томской агломерации. Свинец распределен по территории мозаично и приурочен к точкам вблизи автомобильных магистралей. Кадмий имеет высокий коэффици-

ент концентрации как на отдельных фоновых площадках, так и в промышленной зоне.

5. Выявлены отдельно отстоящие точки (20 — пос. Баткат, 21 — Комаровские болота), удаленные более, чем на 50 км от ГРЭС-2 и 70 км — от СХК. В них содержание в снеговом покрове пыли в 1.5–2 раза выше относительно фона.

6. Многомерный кластерный анализ разделил точки наблюдения на три группы:

- точки северо-восточнее и восточнее промышленной зоны Томск-Северской агломерации, а также точки, удаленные от него на 70 км в районе пос. Баткат и Комаровских болот;
- точки, окружающие городскую агломерацию;
- фоновые точки.

7. Дальний перенос загрязняющих веществ более 70 км от промышленной зоны СХК на запад объясняется гипотезой вихревых потоков области пониженного давления (циклонов), направленных от периферии к его центру против направления ее общего движения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-50062\19 и в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арбузов С.И.* Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2007. № 1. С. 77–83.
2. *Ариунушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв / Под ред. А.И. Бусуева. М.: МГУ, 1970. 487 с.
3. *Артамонова С.Ю.* Оценка аэрозольного техногенного загрязнения района г. Северска с помощью геохимических и ГИС-методов. Новосибирск: ГЕОСИБИРЬ. Изд-во Сибирский государственный университет геосистем и технологий. 2011. Т. 4. С. 2542–2558.
4. *Аэрозоли Сибири* / Отв. ред. К.П. Куценогий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с.
5. *Бордон С.В.* Формирование геохимических аномалий в снежном покрове урбанизированных территорий // Литасфера. 1996. № 5. С. 172–177.
6. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 185 с.
7. *Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А.* Кислотность атмосферных осадков и атмосферные выпадения серы и азота в Арктической зоне Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 46–51.
8. *Глазовский Н.Ф.* Избранные труды в двух томах. Т. 1. Геохимические потоки в биосфере. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 535 с.
9. *Ермилов О.М.* Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне / О.М. Ермилов, Г.И. Грива, В.И. Москвин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 147 с.
10. *Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А.* Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 9 (27). С. 790–800.
11. *Козин В.В., Кузнецова Э.А.* Физико-географические факторы пространственно-временной изменчивости снежного покрова нефтегазопромыслового региона. Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2015. 151 с.
12. *Кондратьев И.И.* Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 107–112.
13. *Крестьянникова Е.В., Козлова В.В., Ларина Н.С., Ларин С.И.* Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 5 (2). С. 679–684.
14. *Московченко Д.В., Бабушкин А.Г.* Особенности формирования химического состава снежного покрова на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 71–81.
15. *Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В.* Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1025–1037.
16. *Робертус Ю.В., Удачин В.Н., Рихванов Л.П., Кивацкая А.В. и др.* Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 9. С. 39–48.
17. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186 № 2932-83. М.: Госкомгидромет, 1991. 693 с.
18. *Сергеева А.Г., Куимова Н.Г.* Снежный покров как индикатор состояния атмосферного воздуха в системе санитарно-экологического мониторинга // Бюллетень патологии и физиологии. 2011. № 40. С. 100–104.
19. *Суховатов К.Ю., Безуглова Н.Н.* Временной ход компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии аэрозоля в пограничном слое атмосферы // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4 (96). С. 62–66. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2017\)4-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)4-10).
20. *Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г.* Динамика элементного состава снежного покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана. 2014. № 6. С. 491–495.
21. *Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А.* Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снежного покрова // Геоэкология. 2014. № 5. С. 408–417.
22. *Ташилова А.А.* Алгоритм исследования эффекта вулканического охлаждения на фоне глобального потепления // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИУС-2018). Матер. второй Междунар. научной конф., посв. 25-летию юбилею Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук. Нальчик: КБНЦ РАН, 2018.
23. *Черняева Л.Е.* Химический состав атмосферных выпадений (Урал и Уральский район) / Л.Е. Черняева, А.М. Черняев, А.К. Могиленских. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 178 с.
24. *Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Чулак Ю.В., Ильенок С.С.* Минерально-вещественный состав пылевых атмосферных выпадений в зонах воздействия промышленных предприятий

- г. Томска // Минералогия техногенеза. 2013. № 14. С. 191–202.
25. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И., Детлеф Д., Серова В.В., Штайн Р. Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Доклады Академии наук. 2002. Т. 383. № 3. С. 385–389.
 26. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В. и др. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 106–118.
 27. Янченко Н.И., Баранов А.Н., Чебыкин Е.П., Колесников С.С., Воднева Е.Н. Особенности и факторы, влияющие на распределение металлов, редкоземельных элементов, углерода и фтора в фильтрате и в твердом осадке снежного покрова города Братска // Вестник ИрГТУ. 2013. № 10 (81). С. 141–148.
 28. Akba O., Kilinc E., Aydin I., Erdogan S., Aydin F., Duz M.Z., Hamamci C. Major and trace element contamination of short-term snow cover during and after a dust storm and analysis by ICP-OES // Atom. Spectros. 2013. № 34. P. 48–52.
 29. Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9 (7), 950–959. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-7-950-959>
 30. Li Z.X. and 10 others. The evolution and environmental significance of glaciochemistry during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China // Quat. Int., 2015. 374, 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.071>
 31. Pankratov F. Long-term continuous monitoring of GEM in the ambient air on the Russian Arctic. Impact of the Eyjafjallajokull and Grimsvotn volcanic eruptions in Iceland / F. Pankratov, A. Mahura, O. Katz, A. Konoplev // Synopsis and Poster, Boundary Layers in High Latitudes: Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI). European Geosciences Union General Assembly 2012. Vienna, Austria, April 22–27, 2012. V. 14. <https://doi.org/10.5194/acp-2018-1228>.
 32. Wu G., Li P., Zhang X., Zhang Ch. Using a geochemical method of dissolved and insoluble fractions to characterize surface snow melting and major element elution // Journal of Glaciology. 2018. 64 (248). P. 1003–1013. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.87>
 33. Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018 // Chemosphere. 2020. V. 251. P. 1–7.
 34. Zhang N.N. and 5 others. Preliminary study of transformation of snow to ice and ion elution during ablation period at a typical temperate glacier region // J. Glaciol. Geocryol., 2010. 32 (3). P. 505–513 (in Chinese).
 35. Zhang C.L. and 7 others. Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tien Shan // Atmos. Res., 2013. № 132–133. P. 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.009>

TRANSBOUNDARY, REGIONAL AND LOCAL GEOCHEMICAL TRANSFER OF CHEMICALS IN SNOW COVER

A. V. Zakharchenko^{a, #}, A. A. Tigeev^a, O. A. Pas'ko^{b, ##}, L. G. Kolesnichenko^{c, ###},
and D. V. Moskovchenko^{a, d, ####}

^a Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Institute of the Problems in the North Development, ul. Malygina 86, Tyumen, 625026 Russia

^b National Research Tomsk Polytechnical University, ul. Lenina 30, Tomsk, 634050 Russia

^c Tomsk State University, ul. Lenina 36, Tomsk, 634050 Russia

^d Tyumen State University, ul. Volodarskogo 6, Tyumen, 625003 Russia

[#]E-mail: avzakh@gmail.com

^{##}E-mail: oap@tpu.ru

^{###}E-mail: klg77777@mail.ru

^{####}E-mail: moskovchenko1965@gmail.com

The ability of snow cover to deposit atmospheric substances allows us to analyze the influx of pollutants. The study of snow filtrate and dust in the Western Altai revealed a geochemical anomaly in the content of sulfates, nitrogenous substances, and elements of polymetallic ores, indicating the transboundary geochemical transfer of chemicals. Cyclonal meteorological phenomena may cause both global and regional redistribution of pollutants in the snow cover. The purpose of the work is to identify the spatial features of the geochemical transboundary, regional and local distribution of aerosols deposited in the snow cover in the areas at different distances from the industrial center using GIS technologies and statistical analysis. The object of study is the snow cover in the Tomsk region. We measured pH, the concentration of nitrate and ammonia nitrogen, phos-

phorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, chlorine (mg/l) in the thawed snow filtrate. Heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn, Cr, Ni) were measured in the solid residue using the atomic absorption spectrophotometry. The average snow thickness is evenly distributed by the studied area with variability over the years. In the forest, the content of dust, NH_4 , P_2O_5 , and Mg is significantly higher than that in the arable land. The content of NO_3^- , NH_4^+ , as well as alkaline and alkaline-earth elements is higher near the industrial zone as compared to their background values. The relationship between the content of Ca and Cl in melt water is established, which indicates an erosion-soil source of Cl. The content of siderophile and lithophile trace elements increases near the industrial zone of the Tomsk agglomeration and decreases with the growing distance from it. Some trace elements are distributed sporadically throughout the territory. In some locations (Batkat settlement, Komarovskiy marshes), more than 60 km from GRES-2 and 70 km from the Siberian Chemical Combine (SCC), an elevated content of chemical elements was found, similar to pollution from SCC. An explanatory hypothesis has been put forward about the transfer of pollutants by winds from the periphery of the low-pressure region to the center of the cyclone when approaching from the west.

Keywords: solid aerosols, snow cover, trace elements, pollutants, cyclonic transfer

REFERENCES

1. Arbuzov, S.I. *Metallonosnost' uglei Sibiri* [Metal content in the Siberian coals]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 1, pp. 77–83. (in Russian)
2. Arinushkina, E.V. *Rukovodstvo po khimicheskoy analizu pochv* [Guide to chemical analysis of soils]. Moscow, MGU Publ., 1970, 487 p. (in Russian)
3. Artamonova, S.Yu. *Otsenka aerol'nogo zagryazneniya raiona g. Severska s pomosh'yu geokhimicheskikh i GIS metodov* [Assessment of aerosol technogenic pollution district of the city of Seversk with the help of geochemical and GIS methods]. Novosibirsk, SGUGiT Publ., 2011, vol. 4, pp. 2542–2558. (in Russian)
4. Andreeva, I.S. et al. *Aerol'ny Sibiri* [Aerosols of Siberia]. Kutsenogii, K. P., Ed., Novosibirsk, SO RAN Publ., 2006, 548 p. (in Russian)
5. Bordon, S.V. *Formirovaniye geokhimicheskikh anomalii v snezhnom pokrove urbanizirovannykh territoriy* [Formation of geochemical anomalies in the snow cover of urbanized territories]. *Litasfera*, 1996, no. 5, p. 172–177. (in Russian)
6. Vasilenko, V.N., Nazarov, I.M., Fridman, Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 185 p. (in Russian)
7. Vetrov, V.A., Kuzovkin, V.V., Manzoni, D.A. *Kislotsnost' atmosferykh osadkov i atmosferynye vypadeniya sery i azota v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii po dannym monitoringa khimicheskogo sostava snezhnogo pokrova* [Atmosphere precipitation acidity and atmosphere precipitation of sulfur and nitrogen in the Arctic zone of the Russian Federation by the monitoring data of chemical composition of the snow cover]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 3 (15), pp. 46–51. (in Russian)
8. Glazovskii, N.F. *Geokhimicheskie potoki v biosfere* [Geokhimical flows in the biosphere]. *Izbrannyye trudy v 2 tomakh*. [Selected works in 2 volumes]. Vol. 1, Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2006, 535 p. (in Russian)
9. Ermilov, O.M., Griva, G.I., Moskvina, V.I. *Vozdeystviye ob'ektov gazovoy promyshlennosti na severnye ekosistemy i ekologicheskaya stabil'nost' geotekhnicheskikh kompleksov v kriolitozone* [Impact of gas industry facilities on Northern ecosystems and ecological stability of geotechnical complexes in the cryolithozone]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002, 147 p. (in Russian)
10. Ermolov, Yu.V., Makhatkova, I.D., Khudyaev, S.A. *Fonovyye kontsentratsii khimicheskikh elementov v snezhnom pokrove tsentral'nogo sektora Zapadnoy Sibiri* [Background concentrations of chemical elements in the snow cover of the Central sector of Western Siberia]. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, no. 9 (27), pp. 790–800. (in Russian)
11. Kozin, V.V., Kuznetsova, E.A. *Fiziko-geograficheskie faktory prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti snezhnogo pokrova neftegazopromyslovogo regiona* [Physico-geographical factors of spatial and temporal variability of the snow cover in the oil and gas field region]. Nizhnevartovsk, Nizhnevart. gos. un-t Publ., 2015, 151 p. (in Russian)
12. Kondrat'ev, I.I. *Atmosfernyy transgranichnyy perenos zagryaznyayushchikh veshchestv iz tsentrov emissii vostochnoy Azii na yug Dal'nevostochnogo regiona Rossii* [Atmospheric transboundary transfer of pollutants from the emission centers in the eastern Asia to the south of the Russia Far East]. *Vestnik DVO RAN*, 2008, no. 1, pp. 107–112. (in Russian)
13. Krest'yannikova, E.V., Kozlova, V.V., Larina, N. S., Larin, S.I. *Khimiko-ekologicheskaya otsenka zagryazneniya svintsom atmosfery goroda Tyumeni* [Chemical and environmental assessment of lead pollution in the atmosphere of the city of Tyumen]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, vol. 17, no. 5(2), pp. 679–684. (in Russian)
14. Moskovchenko, D.V., Babushkin, A.G. *Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava snegovogo pokrova na territorii Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga* [Specifics in the formation of snow-cover chemical composition in Khanty-Mansi autonomous okrug].

- Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 2, p.71–81. (in Russian)
15. Onuchin, A.A., Burenina, T.A., Zubareva, O.N., Trefilova, O.V., Danilova, I.V. *Zagryaznenie snezhnogo pokrova v zone vozdeistviya predpriyatii Noril'skogo promyshlennogo raiona* [Contamination of snow cover in the impact zone of enterprises of the Norilsk industrial district]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2014, no. 6, pp. 1025–1037. (in Russian)
 16. Robertus, Yu.V., Udachin, V.N., Rikhvanov, L.P., Kivatskaya, A.V., Lyubimov, R.V., Yusupov, D.V. *Indikatsiya komponentami prirodnoi sredy transgranichnogo perenosa zagryaznyayushchikh veshchestv na territoriyu Gornogo Altaya* [Indication of transboundary transfer of contaminants to the Mountain Altai area by the environment components]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 39–48. (in Russian)
 17. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [Guidelines for air pollution control]. RD 52.04.186–89. Moscow, 1991, 450 p. (in Russian)
 18. Sergeeva, A.G., Kuimova, N. G. *Snezhnyi pokrov kak indikator sostoyaniya atmosfernogo vozdukh v sisteme sanitarno-ekologicheskogo monitoring* [Snow cover as an indicator of atmospheric air state in the sanitary and environmental monitoring system]. *Byulleten' patologii i fiziologii*, 2011, no. 40, p. 100–104. (in Russian)
 19. Sukhovatov, K.Yu., Bezuglova, N.N. *Vremennoi khod component tenzora koeffitsientov turbulentnoi diffuzii aerolya v pogranichnom sloe atmosfery* [Time variability of turbulent diffusion coefficients tensor for an aerosol in the atmospheric boundary layer]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 4(96), pp. 62–66. (in Russian)
 20. Talovskaya, A.V., Filimonenko, E.A., Yazikov, E.G. *Dinamika elementnogo sostava snegovogo pokrova na territorii severo-vostochnoi zony vliyaniya Tomsk-Severskoi promyshlennoi aglomeratsii* [Dynamics of the of snow-cover elemental composition in the northeastern zone of the Tomsk-Seversk industrial agglomeration influence]. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, no. 6, pp. 491–495. (in Russian)
 21. Talovskaya, A.V., Yazikov, Ye.G., Filimonenko, Ye.A. *Otsenka zagryazneniya atmosfernogo vozdukh urbanizirovannykh raionov Tomskoi oblasti po dannym izucheniya snegovogo pokrova* [Assessment of atmosphere pollution in urbanized areas of the Tomsk region according to the results of snow cover study]. *Geologiya*, 2014, no. 5, pp. 408–417. (in Russian)
 22. Tashilova, A.A. *Algoritm issledovaniya effekta vulkanicheskogo okhlazhdeniya na fone global'nogo potepleniya* [Algorithm of volcanic cooling effect study upon global climate warming]. *Materialy vtoroi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii MMIIUS-2018* [Proc.2nd International scientific conference MMIIUS-2018], 2018, Nal'chik, KBNC RAN Publ. (in Russian)
 23. Chernyaeva, L.E., Chernyaev, A.M., Mogilenskikh, A.K., *Khimicheskii sostav atmosferykh vypadenii (Ural i Ural'skii raion)* [The chemical composition of atmospheric precipitation (the Urals and the Ural district)]. Leningrad., Gidrometeoizdat, 1978, 178 p. (in Russian)
 24. Filimonenko, E.A., Talovskaya, A.V., Yazikov, E.G., Chumak, Yu.V., Ilyenok, S.S. *Mineral'no-veshchestvennyi sostav pylevykh atmosferykh vypadenii v zonakh vozdeistviya promyshlennykh predpriyatii g.Tomska* [Mineral and substance composition of dust atmospheric precipitation in the zones affected by Tomsk industrial enterprises]. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 2013, no. 14, p. 191–202. (in Russian)
 25. Shevchenko, V.P., Lisitsyn, A.P., Polyakova, E.I., Detlef, D., Serova, V.V., Stein, R. *Raspredelenie i sostav osadochnogo materiala v snezhnoim pokrove dreifuyushchikh l'dov Arktiki (proliv Fram)* [Distribution and composition of sedimentary material in the snow cover of the Arctic drifting ice (Fram Strait)]. *Doklady Akademii nauk*, 2002, vol. 383, no. 3, pp. 385–389. (in Russian)
 26. Shevchenko, V.P., Lisitsyn, A.P., Stein, R., Goryunova, N.V., et al. *Raspredelenie i sostav nerastvorimykh chastits v snege Arktiki* [Distribution and composition of insoluble particles in the Arctic snow]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, no. 75, p. 106–118. (in Russian)
 27. Yanchenko, N.I., Baranov, A.N., Chebykin, E.P., Kolesnikov, S.S., Vodneva, E.N. *Osobennosti i faktory, vliyayushchie na raspredelenie metallov, redkozemel'nykh elementov, ugleroda i flora v fil'trate i v tverdom osadke sněžnogo pokrova g. Bratska* [Features and factors affecting the distribution of metals, rare earth elements, carbon and fluorine in the filtrate and solid sediment of the Bratsk snow cover]. *Vestnik IrGTU*, 2013, no. 10 (81), pp. 141–148. (in Russian)
 28. Akba, O., Kilinc, E., Aydin, I., Erdogan, S., Aydin, F., Duz, M.Z., Hamamci, C. Major and trace element contamination of short-term snow cover during and after a dust storm and analysis by ICP-OES. *Atom. Spectros*, 2013, no. 34, p. 48–52.
 29. Lezhenin, A.A., Yaroslavl'tseva, T.V., Raputa, V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, no. 9(7), pp. 950–959. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-7-950-959>
 30. Li, Z.X., et al. The evolution and environmental significance of glaciochemistry during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China. *Quat. Int.*, 2015, no. 374, pp. 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.071>
 31. Pankratov, F. Long-term continuous monitoring of GEM in the ambient air on the Russian Arctic. Impact of the Eyjafjallajökull and Grimsvotn volcanic eruptions in Iceland. In: Synopsis and Poster, Boundary Layers in High Latitudes: Physical and Chemical Processes Including Atmosphere-Ice Chemical Interactions (AICI). European Geosciences Union General

- Assembly 2012. Vienna, Austria, April 22–27, 2012, vol. 14.
<https://doi.org/10.5194/acp-2018-1228>
32. Wu, G., Li, P., Zhang, X., Zhang, Ch. Using a geochemical method of dissolved and insoluble fractions to characterize surface snow melting and major element elution. *Journal of Glaciology*, 2018, no. 64 (248), pp. 1003–1013.
<https://doi.org/10.1017/jog.2018.87>
33. Xue, H., Chen, W., Li, M., Liu, B., Li, G., Han, X. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, p. 1–7.
34. Zhang, N.N., *et al.* Preliminary study of transformation of snow to ice and ion elution during ablation period at a typical temperate glacier region. *J. Glaciol. Geocryol.*, 2010, no. 32(3), pp. 505–513. (in Chinese).
35. Zhang, C.L., *et al.* Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tien Shan. *Atmos. Res.*, 2013, no. 132–133, pp. 299–308.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.009>