

УДК 550.462

Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири

Ю.В. Ермолов, И.Д. Махатков, С.А. Худяев*

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2*

Поступила в редакцию 16.10.2013 г.

Исследовано варьирование концентраций зольных химических элементов в снежном покрове фоновых районов центрального сектора Западной Сибири. Обнаружены сужение диапазона варьирования и уменьшение концентраций химических элементов в северном направлении. Это наблюдается не только для типичных «почвенно-эрозионных» химических элементов (Ca, Fe, Al, Sr), но и для считающихся «техногенными» (V, Co, Pb, Zn, Cd). Снижение концентраций к северу наиболее выражено на участке между степной зоной и подзоной южной тайги.

Ключевые слова: снеговой покров, фоновые концентрации, химические элементы, Западная Сибирь; snow cover, background concentrations, chemical elements, Western Siberia.

Введение

Состав атмосферных аэрозолей находится под усиливающимся влиянием техногенного фактора, что сказывается на количестве и соотношениях химических элементов, выпадающих на земную поверхность [1, 2]. Для мониторинга загрязнения воздушной среды и атмосферного поступления поллютантов в другие компоненты ландшафта широко используется снежный покров. В Западной Сибири такие работы ведутся большей частью в импактных районах, вблизи источников выбросов [3–11], в то время как фоновые районы остаются слабо исследованными. Широкомасштабные работы, проведенные в Алтайском крае [12], выполнены без учета удаленности мест отбора проб от источников техногенной эмиссии.

Имеющиеся данные о фоне в некоторых районах Западной Сибири [4, 10, 13–15] получены в разное время, разными методами, по разным фазам (твердые или растворенные), имеют различия в перечне определяемых химических элементов и способе выражения данных (концентрация, модуль поступления, нагрузка). Все это затрудняет сопоставление опубликованных данных с целью обобщения и выявления пространственных закономерностей изменчивости фона в регионе. В связи с этим основная цель наших исследований в рамках данной статьи – дать характеристику уровня и широтной изменчивости фоновых концентраций зольных химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири.

Объекты и методы исследований

Весной 2009 г. нами были выполнены маршрутное обследование и отбор проб ($n = 103$) снежного покрова в пределах центрального сектора (74–82° в.д.) Западной Сибири. Обследование проводилось в период максимального влагозапаса, с середины марта (юг) по начало апреля (север). Маршрут общей протяженностью около 1400 км с юга на север проходил через степную зону (Кулундинская равнина), лесостепь (Барабинская равнина), подтаежную и таежную зоны (Васюганская равнина, Среднеобская низменность, Сибирские увалы) и лесотундру (Пурская низменность). Площадки отбора проб выбирались на значительном удалении от источников техногенных выбросов. Расстояние точек опробования составляло не менее 10 км от сельских населенных пунктов, 30 км от районных центров и 300 м от автодорог (с наветренной стороны, исходя из преобладания ветров северо-восточного направления). Пробы массой 2–3 кг брались с помощью цилиндрического пробоотборника (диаметр сечения 11 см) по 3–10 кернов (в зависимости от мощности снежного покрова в пункте отбора), взвешивались и помещались в пластиковые емкости. При отборе проб осуществлялись измерение мощности снеговой толщи и GPS-привязка точек обследования. В пределах семи пунктов опробования пробы отбирались в трехкратной повторности для исследования локальной неоднородности геохимических параметров.

В лаборатории пробы растапливались и фильтровались через фильтр «синяя лента» [16]. Часть фильтрата (для элементного химического анализа) подкисляли концентрированной азотной кислотой (ОСЧ), в другой части сразу после фильтрования

* Юрий Викторович Ермолов (ermolov.07@mail.ru); Игорь Дмитриевич Махатков (makhatkov@mail.ru); Сергей Анатольевич Худяев (xsa_nsk@mail.ru).

определяли реакцию среды (рН) и удельную электропроводность.

Элементный анализ (Na, Mg, Al, Ca, V, Mn, Si, K, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Sr, Zr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, Bi) снеговой воды проводили методом масс-спектрометрии (ISP-MS) в аналитическом центре Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Для анализа содержания в снеге химических элементов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, K, Na, Ca, Mg, Li) из твердых примесей использовали метод атомно-адсорбционной пламенной спектрометрии. При подготовке проб к этому анализу фильтры с примесями помещали в кварцевые чашки и озоляли в муфеле при температуре 450 °С, затем определяли массу зольной части твердых примесей и разлагали золу в автоклавах-минерализаторах при температуре 150 °С смесью концентрированных кислот с последующим растворением горячей подкисленной (HNO₃) бидистиллированной водой [17].

Изменчивость изученных показателей после выбраковки проб с явными признаками локального загрязнения характеризовалась пределами варьирования, квартилями и коэффициентом вариации.

Результаты исследований и обсуждение

Статистический анализ полученных данных показал, что изменчивость фоновых концентраций химических элементов в снеге очень велика

(табл. 1–3). Разброс значений для каждого из элементов охватывает 1–2 порядка, коэффициенты варьирования v существенно (в 2–6 раз) выше 33%, что указывает на неоднородность выборки и существенное отклонение изменчивости показателей от закона нормального распределения. Вместе с тем столь сильный разброс концентраций химических элементов в снеге, учитывая значительную протяженность маршрута отбора проб, может быть, как было показано многими исследованиями [18–21], вполне естествен и обусловлен закономерным широтным изменением факторов формирования примесей [13, 18, 22, 23]. Действительно, при рассмотрении полученных данных в зависимости от географической широты отбора проб выявлено, что для многих параметров наблюдается уменьшение значений с юга на север территории. Особенно резкое уменьшение значений происходит при переходе от степи к южной тайге.

На этом участке удельная электропроводность падает в 2–3 раза (рис. 1). В пересчете удельной электропроводности на минерализацию (по NaCl) значения снижаются с 10–12 в степи до 4–5 мг/дм³ в средней и северной тайге.

Эта оценка фоновой минерализации снеговых вод в таежной зоне Западной Сибири весьма близка к данным, полученным для таежной зоны северо-востока европейской части России (в среднем 5,9 мг/л) [18]. В пределах средней и северной тайги значения удельной электропроводности достигают минимума, а в лесотундре прослеживается незначи-

Таблица 1

Варьирование рН, удельной электропроводности (мСм/м) и концентраций растворенной формы химических элементов (мкг/дм³) в снеговой воде

Показатель	min–max	Квартили 25%–50%–75%	v , %	Коэффициент корреляции (Спирмена) между концен- трацией элемента и уд. электропроводностью
Уд. электро- проводность	0,55–3,2	0,9–1,1–1,3	44	
рН	4,31–6,41	4,77–5,02–5,39	9,3	0,10
Na	63–2915	129–174–236	150	0,88
Mg	35–572	63–91–149	88	0,82
Al	2,8–50,9	5,8–10,3–19,0	78	0,68
Ca	132–2202	308–409–703	77	0,78
V	0,02–0,4	0,06–0,08–0,16	81	0,83
Mn	0,2–19,9	1,2–2,9–6,5	100	0,54
Si	1–86	1–11–24	118	0,64
K	<10–832	<10–57–161	>138	0,52
Ti	<0,01–1,01	0,04–0,11–0,28	>114	0,59
Cr	<0,003–0,45	<0,003–0,08–0,14	>68	0,43
Fe	1–81	7–15–21	79	0,24
Co	0,004–0,140	0,015–0,023–0,039	81	0,64
Ni	<0,005–2,62	0,10–0,18–0,45	>135	0
Cu	<0,04–2,2	0,30–0,42–0,70	>83	0,41
Zn	0,5–21,0	1–3–4,5	99	0,16
Se	<0,002–0,250	0,002–0,009–0,020	>203	0,15
Sr	0,7–12,6	1,3–1,8–3,2	95	0,83
Cd	<0,01–0,08	0,02–0,04–0,05	>51	0,52
Sn	<0,001–0,188	0,006–0,017–0,033	>115	–0,08
Sb	0,002–0,048	0,016–0,020–0,026	40	0,27
Ba	1,2–11,5	1,7–2,3–3,8	68	0,84
Pb	<0,01–3,0	0,1–0,3–0,5	>127	0,42
Bi	<0,002–0,052	0,002–0,005–0,008	>104	–0,05

Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири 791

**Фоновые концентрации минеральной части твердых примесей
и нерастворимой формы химических элементов в снеге, мкг/кг**

Показатель	При- меси	Pb	Li	Sr	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
min	0,6	<0,1	0,002	0,55	4	12	31	45	15	0,6	<0,1	0,9	0,5	0,01
25%	2,1	0,7	0,01	1,38	6	26	102	61	31	1,4	0,3	1,6	0,8	0,02
Квартили 50%	3,4	1,0	0,02	2,30	14	43	175	69	59	2,8	0,5	2,2	1,0	0,04
75%	7,0	1,5	0,07	3,09	35	70	274	96	111	5,1	0,7	3,7	1,3	0,07
max	38	3,0	0,35	5,34	234	166	590	314	656	23	1,9	10,1	2,5	0,16
v, %	120	58	140	45	142	61	67	62	123	109	63	66	35	64
Коэффициент корреляции (Спирмена) между концентрацией элемента и содержанием минеральной части твердых примесей		0,68	0,78	0,01	0,94	0,40	0,61	0,86	0,95	0,64	0,21	0,86	0,45	0,57

Таблица 3

Общее содержание химических элементов в пробах снега, мкг/кг

Показатель	Pb	Sr	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
min	0,1	1,5	9	84	224	97	21	1,0	0,06	1,5	0,6	0,02
25%	0,9	3,1	65	170	432	127	46	2,7	0,49	3,4	1,2	0,05
Квартили 50%	1,3	4,4	161	220	566	155	71	5,4	0,70	5,2	1,5	0,10
75%	2,0	5,8	310	365	866	230	125	11,7	1,25	8,5	2,0	0,11
max	4,1	15,9	898	3596	2784	839	688	37,4	3,45	21,0	4,23	0,23
v, %	61	56	125	137	68	72	110	95	71	63	42	56
Коэффициент корреляции (Спирмена) между концен- трацией элемента и содер- жанием минеральной части твердых примесей	0,61	0,72	0,58	0,71	0,84	0,79	0,94	0,69	0,02	0,46	0,41	0,51

тельное их увеличение, что, возможно, обусловлено близостью морского побережья и усилением влияния морских аэрозолей [19, 21]. Судя по уровню концентраций химических элементов и их корреляции с удельной электропроводностью, среди катионов за широтное снижение общей минерализации ответственны прежде всего кальций, магний и натрий. Также тесная корреляционная связь с удельной электропроводностью обнаружена для концентраций стронция, бария, ванадия, кремния и кобальта.

Реакция среды (pH) снеговой воды в северном направлении проявляет тенденцию к подкислению (см. рис. 1), что объясняется уменьшением с юга на север концентраций кальция и магния – главных нейтрализаторов кислотных остатков в атмосфере [13, 24]. Связь pH с суммарной концентрацией этих катионов линейна и характеризуется высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,81$). Отчетливое смещение pH в щелочную сторону начинает наблюдаться при суммарной концентрации ионов кальция и магния более 80 мкг-экв/л. Такие значения характерны для снеговых осадков [13] и талых вод степной и лесостепной зон Западной Сибири. Вместе с тем несвязанное с широтой и концентрациями кальция и магния варьирование pH снеготалой воды также достаточно велико. В 2009 г. в степной и лесостепной зоне значения pH укладывались в диапазон 5,0–6,5, в южной тайге 4,7–5,7, в средней и северной тайге 4,5–5,5. Варьирование в пределах одной широты, вероятно, вызвано локальной

изменчивостью концентраций кислотных агентов в составе примесей.

Исследованные в жидкой фазе снега химические элементы по характеру изменения концентрации с географической широтой можно разделить на три группы. Для первой группы элементов (кальций, магний, натрий, стронций, барий, ванадий, алюминий) наблюдается четко выраженный тренд уменьшения концентрации с юга на север территории (см. рис. 1). Как и в случае с электропроводностью, скорость снижения максимальна на участке от степи к южной тайге. Особенно отчетливо выражены широтные изменения концентраций для бария и ванадия, о чем свидетельствует высокая достоверность аппроксимации функций ($R^2 > 0,8$), описывающих зависимость концентраций от географической широты места отбора пробы. Для бария в среднем наблюдается 4-кратное снижение фоновой концентрации от 53 к 66° с.ш., а для ванадия приблизительно 7-кратное. К сожалению, в связи с отсутствием у нас данных о содержании нерастворимой формы этих элементов в снеге нельзя сказать, являются ли эти тренды отражением снижения общего количества элемента в снеге или обусловлены изменением соотношения химических форм элементов с юга на север территории.

Количества других элементов этой группы весьма сильно варьируют в степной зоне, а при продвижении на север это варьирование заметно слабеет,

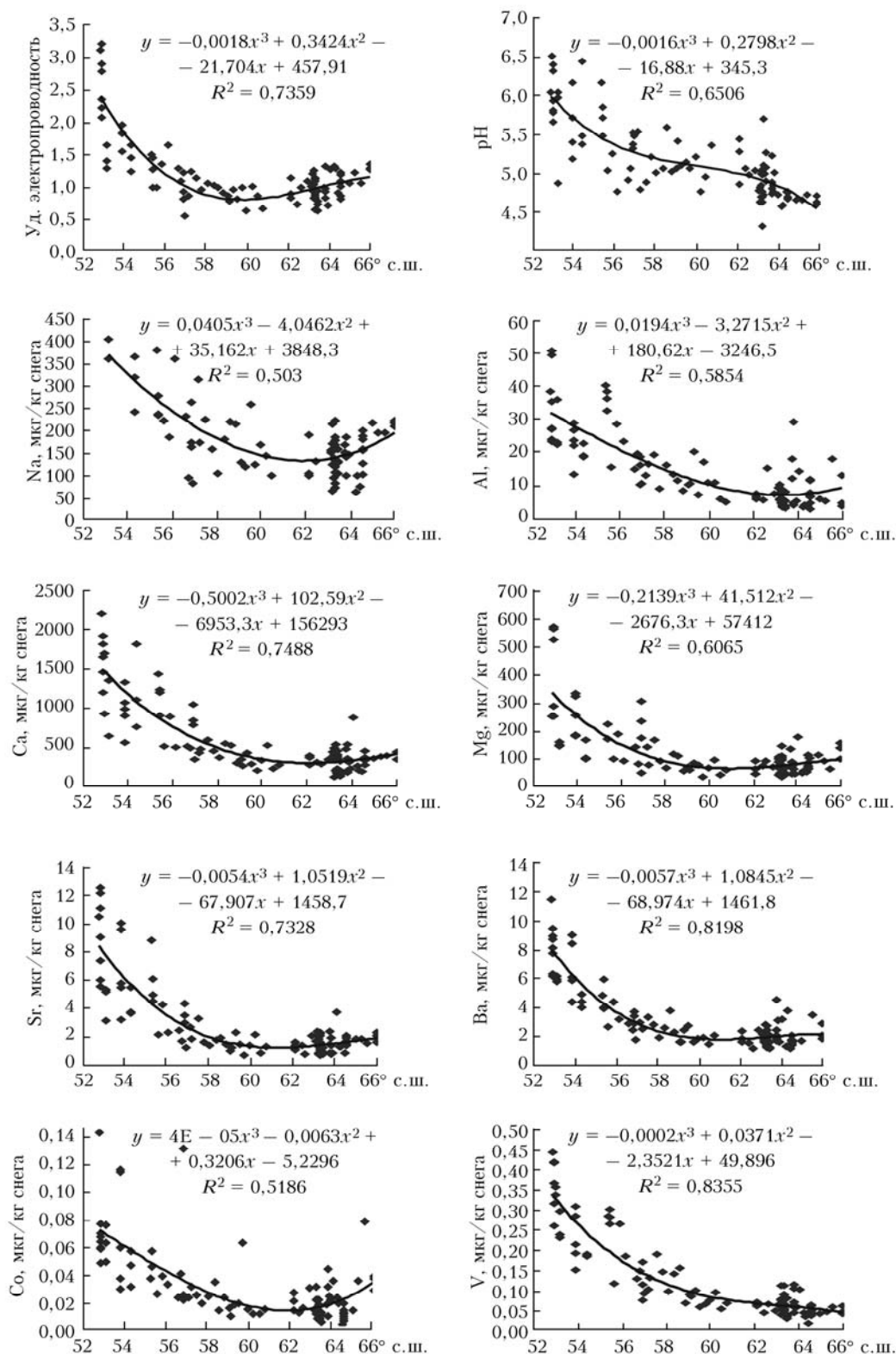


Рис. 1. Широтное изменение электропроводности (мСм/м), рН и концентраций водорастворимой формы химических элементов (мкг/дм³) в снеговой воде

смещаясь в сторону низких значений. В среднем уровень концентраций снижается для них в 3–4 раза. Широкое варьирование в степной зоне, видимо, вызвано влиянием природных и антропогенных факторов локального масштаба, некоторые из них обсудим ниже.

Для второй группы элементов (марганец, калий, свинец, кобальт, кадмий) тенденция к снижению концентрации растворенной формы к северу менее заметна на фоне значительного локального варьирования. В связи с этим часто она проявляется более отчетливо по изменению одного (верхнего или нижнего) предела варьирования. Так, верхний предел фоновых концентраций для растворенного марганца ориентировочно находится на уровне 15–20 мкг/кг снега для всей обследованной территории, нижний же предел падает от 5 мкг/кг в степной зоне до 0,5 в тайге. Для растворимой формы свинца более зависим от широты верхний предел фоновой концентрации. В степной и лесостепной зонах он обозначился на уровне 3 мкг/кг, в таежной и лесотундровой зонах не превышал 1,5 мкг/кг. Фоновое количество растворенного кадмия с юга на север в среднем снижается от 0,06 до 0,02 мкг/кг снега, сильно варьируя на всех участках маршрута. Среднее значение концентраций растворимого кобальта составило 0,08 мкг/кг на юге и до 0,03 мкг/кг на севере.

Для третьей группы элементов (цинк, медь, селен, никель, олово, сурьма и висмут) признаков широтного изменения фоновых концентраций растворенной формы не обнаружено. Верхний предел фоновой концентрации растворенного цинка не превышает 20 мкг/кг снега. Более высокие значения, на наш взгляд, могут указывать на локальное загрязнение. Фоновый уровень концентрации олова, по всей видимости, не превышает 0,1 мкг/кг. Большинство значений повсеместно ниже 0,05 мкг/кг. Для растворимой части сурьмы и висмута верхней границей фоновых значений в Западной Сибири, по-видимому, можно считать рубеж в 0,05 мкг/кг, основная же часть значений в выборке не превышала 0,03 мкг/кг. Фоновый уровень концентраций селена в снеговой воде обычно не превышает 0,05 мкг/кг, в выборке присутствовали и существенно более высокие значения (0,09–0,25 мкг/кг), но судя по их сильному отклонению от основной части значений они не являются фоновыми (90% от всех проб имели уровень селена < 0,03 мкг/кг).

В изменчивости количества твердых примесей в снеге и концентраций нерастворимой формы многих из изученных элементов обнаружены аналогичные пространственные тенденции (рис. 2).

Наиболее четко выражено снижение к северу концентрации нерастворимых форм железа, калия и цинка ($R^2 > 0,5$). Резкое снижение концентраций наблюдается на участке от степи к южной тайге, далее к северу они снижаются существенно слабее, достигая минимума в пределах средней тайги, и остаются на этом уровне в северной тайге и лесотундре.

Уровень концентраций нерастворимой части большинства химических элементов в снеге наиболее изменчив в степной зоне. Диапазон варьирова-

ния содержания нерастворимого железа в степи находится в пределах от 150 до 700 мкг/кг снега, севернее, вместе с падением средней концентрации, наблюдается сужение диапазона: 100–400 мкг/кг снега в лесостепи, 60–120 мкг/кг в южной тайге, 18–100 мкг/кг в средней и северной тайге. Аналогично изменяется и диапазон концентраций нерастворимого калия: 36–230 мкг/кг в степи, 20–115 мкг/кг в лесостепи, 4–30 мкг/кг в таежной зоне. Для цинка диапазоны концентраций смещаются с юга на север следующим образом: 3,7–10,2 мкг/кг снега в степи, 2,1–6,5 мкг/кг в лесостепи, 1,7–4,6 мкг/кг в южной тайге, 0,9–3,4 мкг/кг в средней и северной тайге. Достаточно хорошо выражена тенденция снижения концентрации к северу для нерастворимой формы свинца. Лучше это видно по изменению максимальных значений. В степной и лесостепной зонах максимум концентрации свинца достигает 3 мкг/кг снега, в подзоне южной тайги 2,2 мкг/кг, в средней тайге 1,7 мкг/кг, в северной тайге 1,6 мкг/кг.

Также по верхнему пределу варьирования наблюдается широтное смещение диапазона концентраций в область низких значений нерастворимой формы кальция, магния, кадмия. Максимальная фоновая концентрация нерастворимого кальция изменяется практически прямолинейно от 600 мкг/кг снега в степной зоне до 200 мкг/кг на переходе северной тайги к лесотундре. Для нерастворимого магния верхняя граница фоновых концентраций снижается на этом отрезке приблизительно с 300 до 100 мкг/кг. Верхний предел фонового варьирования количества нерастворимого кадмия уменьшается с юга на север от 0,17 мкг/кг (степная зона) до 0,06 мкг/кг (северная тайга). Для нерастворимой формы марганца верхний предел фонового варьирования выявлен недостаточно четко, можно лишь сказать, что он, по всей видимости, не превышает 25 мкг/кг. Отчетливее широтная тенденция проявляется по нижней границе варьирования концентраций марганца. Минимальная концентрация снижается приблизительно от 4 мкг/кг снега в степной зоне до 0,6 мкг/кг в подзоне северной тайги.

Нет признаков уменьшения концентрации с юга на север в снеге для нерастворимой формы натрия, стронция, меди и никеля. Диапазоны их варьирования (см. табл. 2) приблизительно одинаковы на всех широтах.

Таким образом, далеко не для всех «широтозависимых» элементов понижение концентраций с юга на север наблюдается одновременно для растворимой и нерастворимой форм. Коэффициенты положительной корреляции между формами для большинства элементов невысокие. В связи с этим широтное изменение общей концентрации определяется соотношением форм. По мнению некоторых исследователей, в фоновых районах для большинства металлов преобладает растворенная форма в снеге [18]. Сравнительный анализ опубликованных сведений [18, 20] и наши данные свидетельствуют о недостаточной обоснованности этого утверждения. Относительное содержание растворенной и нерастворенной

форм химических элементов в снеге, судя по нашей выборке, достаточно индивидуально (рис. 3). Эта индивидуальность проявляется в различных сред-

них значениях, в неодинаковом варьировании, а для отдельных элементов еще и в проявлении широтных закономерностей изменчивости.

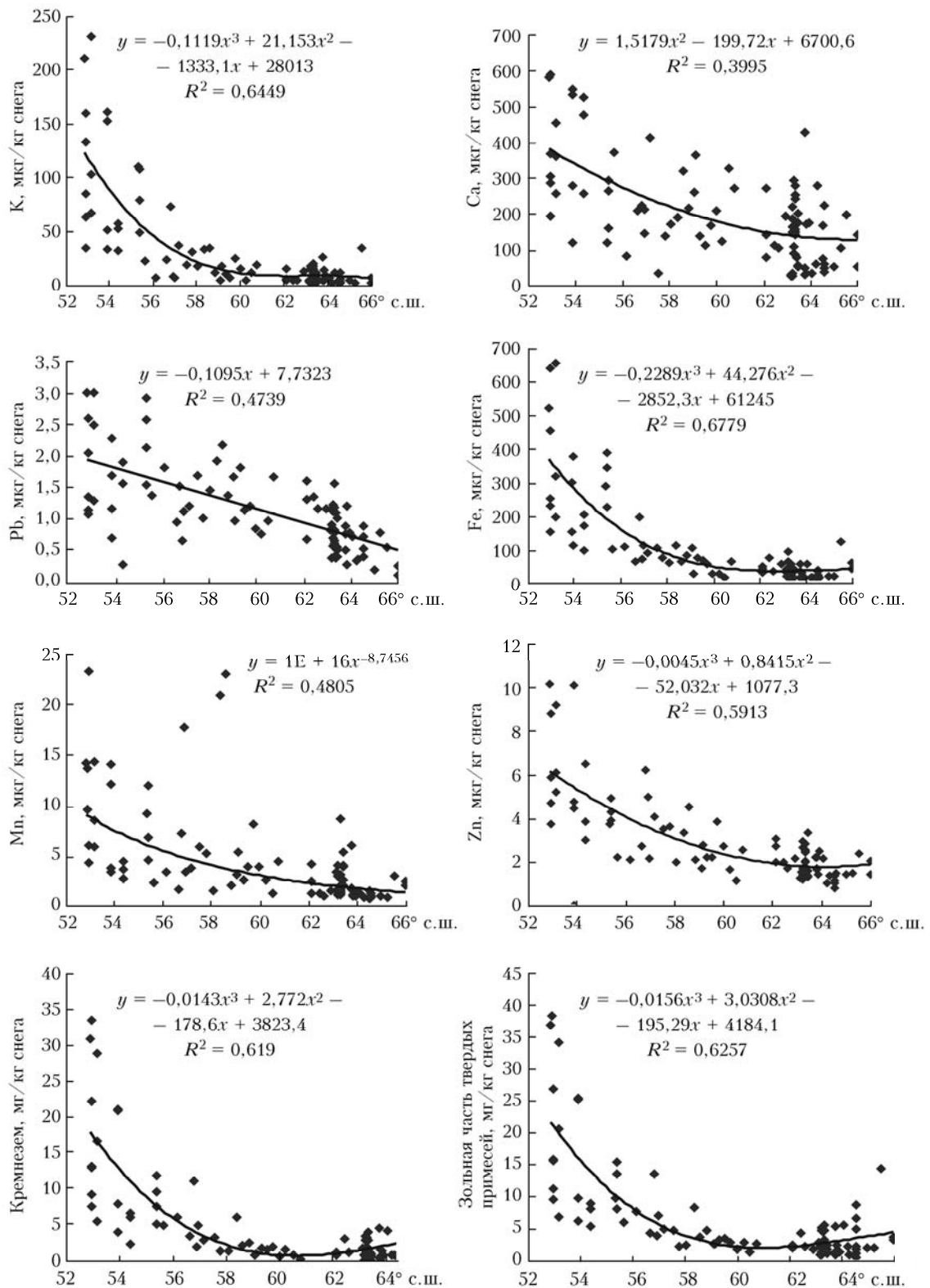


Рис. 2. Широтное изменение содержания зольной части твердых примесей, кремнезема и концентраций нерастворимой формы химических элементов в снеге, мкг/кг

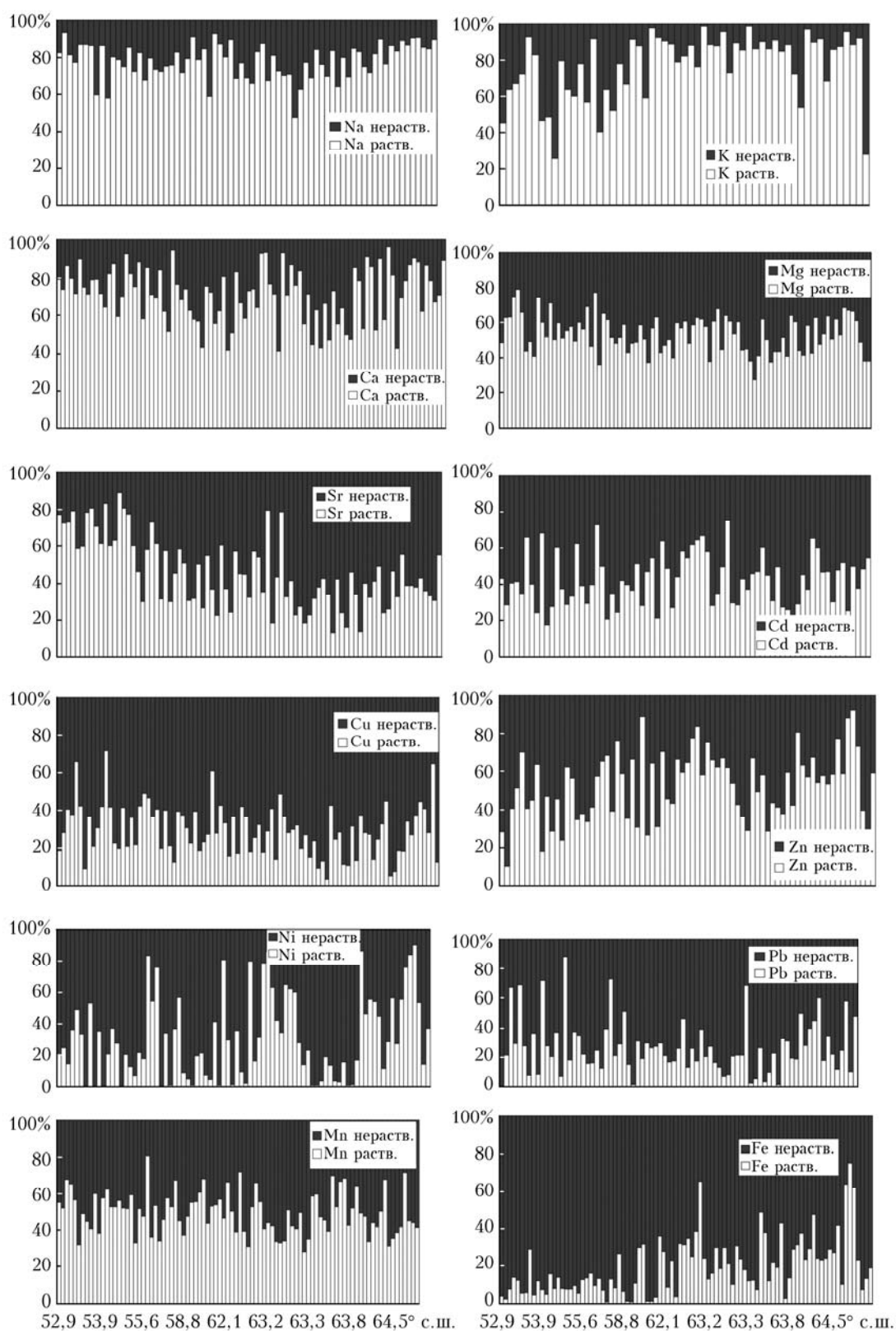


Рис. 3. Относительное содержание растворимой и нерастворимой форм химических элементов в снегу в зависимости от географической широты

Для натрия растворенная часть устойчиво преобладает над нерастворенной во всех пробах. В среднем $(80,1 \pm 1,1)\%$ натрия при таянии снега оказывается в растворенной форме. Этот процент существенно не изменяется на всей исследуемой территории. Стоит отметить, что наблюдаемые в Западной Сибири значения не согласуются с данными по северо-востоку европейской части России, где обнаружено практически 100% натрия в растворенной форме [18], и очень сходны с данными для Центральной Арктики [20].

Для калия и кальция показатель менее устойчив, чем для натрия, но в большинстве случаев также имеет место выраженное преобладание количества элемента в жидкой фазе (среднее относительное содержание растворимой формы калия – 77%, кальция – 71%) без закономерных изменений по широте. Для сравнения, на северо-востоке европейской части России средний процент растворенного кальция около 90% [18], а в фоновых районах Центральной Арктики, напротив, почти весь кальций был представлен нерастворимой формой [20].

Доли растворенного магния (в среднем 46%) и марганца (50%) весьма близки к значениям, найденным в Центральной Арктике, и существенно меньше величин, характерных для северо-востока европейской части России. При этом в отличие от остальных изученных элементов между концентрациями растворенного и нерастворимого марганца в снеговой воде обнаружена весьма тесная положительная корреляция (табл. 4), что говорит об устойчивости соотношения марганца в степени окисления +4 (нерастворимая форма) и степени окисления +2 (растворимая форма) в примесях при снеготаянии.

Распределение стронция между твердой и жидкой фазами существенно меняется с юга на север. На юге, в пределах степной и лесостепной зон, чаще преобладает растворенная форма элемента, в таежной и лесотундровой зонах, напротив, обычно большая часть элемента находится в твердых примесях (рис. 4). Это различие обусловлено широтным снижением концентрации растворимого стронция в снеге на фоне его варьирующей, независимо от широты, концентрации нерастворимой формы.

Для кадмия, меди, свинца и железа в большинстве случаев характерно преобладание нерастворимой в воде формы элемента. Среднее относительное содержание растворимой формы меди составляет около 30% от общего содержания, кадмия 43%, свинца 27%, что существенно меньше, чем обнаружено на северо-востоке европейской части России. Это же можно сказать и о железе. Соотношение форм железа с юга на север смещается в сторону растворимой формы. Это, возможно, также является следствием снижения роли почвенно-эрозионного фактора в формировании примесей снега. В степ-

ной и лесостепной зонах относительное содержание растворенного железа, как правило, не превышает 15%, для таежной зоны обычны значения 20–30%.

Таким образом, соотношение растворимой и нерастворимой форм химических элементов в снеговом покрове Западной Сибири имеет как сходства, так и существенные различия с соотношениями в соседних регионах, подчеркивая ее особенности в формировании снеговых примесей.

Уменьшение общего содержания в снеге (растворимая + нерастворимая формы) в северном направлении обнаружено для большинства исследованных химических элементов за исключением никеля и меди. Наиболее отчетливо оно прослеживается для свинца, кадмия, стронция, железа, кальция и магния (см. рис. 4).

Наблюдаемое снижение концентраций является следствием ослабления атмосферной миграции почвенных частиц и уменьшения их участия в составе выпадающих атмосферных примесей [24]. В степной и лесостепной зонах условия для атмосферного переноса почвенных частиц наиболее благоприятны. Здесь преобладают почвы на минеральных породах, земли сильно распаханы, широко применяется их зяблевая обработка, мощность снега относительно небольшая. Дефляция в таких условиях может быть довольно интенсивной даже в зимний период [25, 26]. Снег сдувается с плоских распаханых участков, иногда вплоть до обнажения поверхности почвы. Кроме того, заслуживает внимания влияние сильно-соленых, усыхающих озер [23]. Вокруг таких озер существуют пояса солончаков, которые в недавнем прошлом были дном озера. В зимний период сами озера и незадернованная поверхность солончаков длительное время или практически совсем не замерзают. Снег с этих участков, как и с пашни, сдувается вместе с солями и частицами почвы, распространяя их на прилегающие территории. Так, например, в пробах снега, взятых вблизи оз. Кулундинского и оз. Баган (на расстоянии до 2 км от берегов), нами обнаружено существенное превышение фона (в 1,5–3 раза) по удельной электропроводности и содержанию растворенной формы натрия, магния, калия, стронция и свинца.

С юга на север Западной Сибири площади пахотных земель, солончаков и соленых озер уменьшаются вплоть до полного исчезновения в таежной зоне, нарастают облесенность и заболоченность территории, увеличивается ее удаленность от сухостепных районов, возрастают количество снеговых осадков и влагозапас снегового покрова. За счет увеличения мощности снегового покрова и уменьшения площади безлесных открытых пространств осуществляется лучшая изоляция поверхности почвы от воздействия ветра, а рост влагозапаса приводит к большему разбавлению примесей снежной массой.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции (Спирмена) между концентрациями растворимой и нерастворимой форм химических элементов в снеге

Na	K	Mg	Ca	Sr	Fe	Cu	Mn	Cd	Zn	Ni	Pb
0,44	0,42	0,54	0,32	-0,02	0,39	0,43	0,90	0,37	0,20	0,03	0,24
$\pm 0,10$	$\pm 0,12$	$\pm 0,09$	$\pm 0,10$	$\pm 0,11$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 0,11$	$\pm 0,12$	$\pm 0,11$

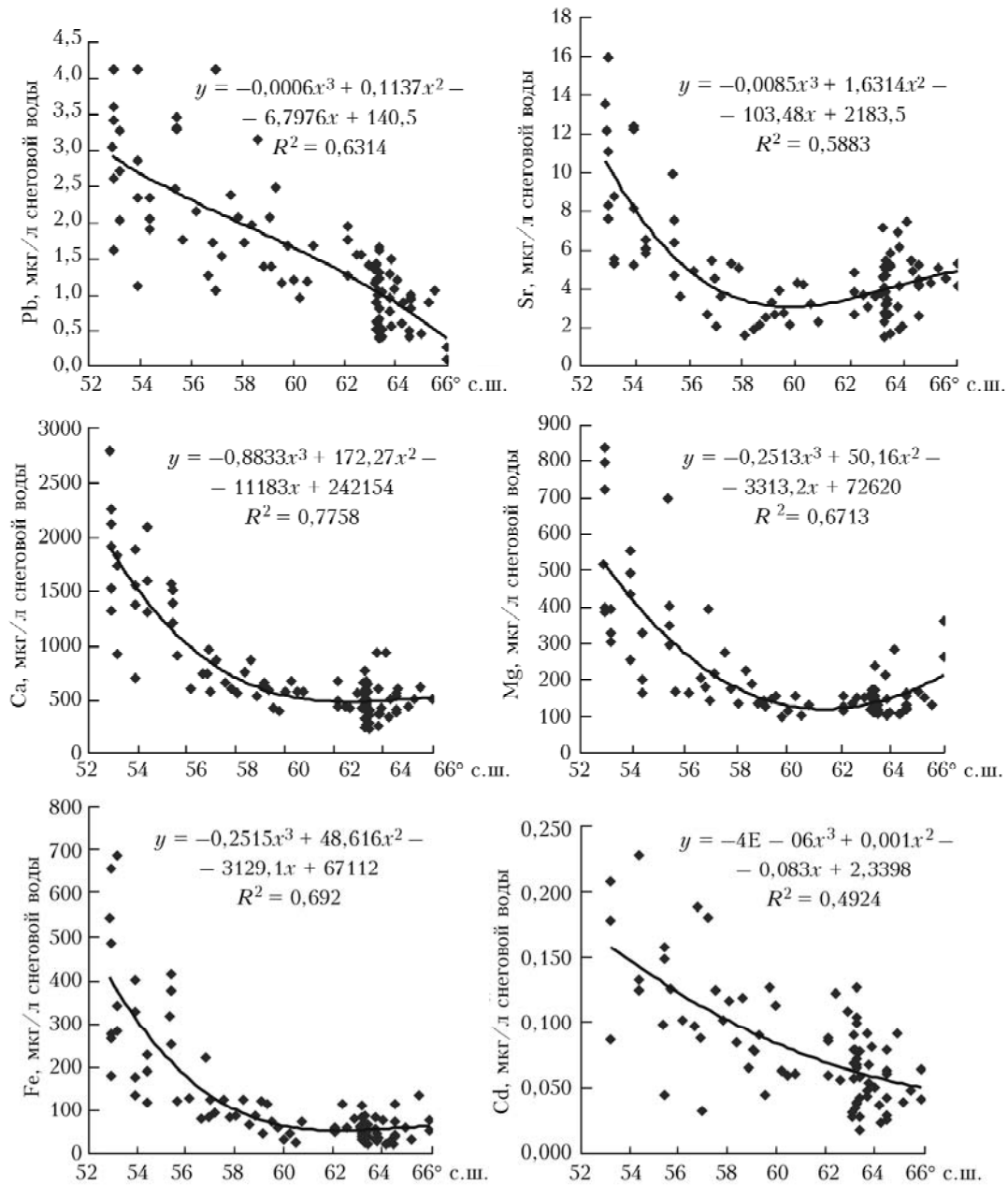


Рис. 4. Широтное изменение общих концентраций (жидкая + твердая фаза примесей) свинца, стронция, кальция, магния, железа и кадмия в снеге, мкг/кг

Как уже отмечалось, в северном направлении для многих геохимических параметров, наряду с общей тенденцией снижения значений, также прослеживается уменьшение размаха их варьирования. В степной зоне варьирование почти всех показателей максимально. Это указывает на существенное влияние здесь локальных факторов, не связанных с поступлением примесей вследствие дальнего переноса аэрозолей. Наблюдаемые различия в значительной мере обусловлены здесь неодинаковым загрязнением проб снега частицами почвы и пылью с поверхности растительности, которого невозможно избежать при наземном размещении пунктов отбора проб.

Для минимизации влияния почвы и растительности применяется размещение фоновых пунктов отбора проб на поверхности замерзших водоемов [21], идеально же, на наш взгляд, хотя и существенно более затратно размещение емкостей для сбора проб снега выше поверхности почвы и верхнего яруса растительного покрова. Тем не менее на основе наших данных можно приблизительно оценить обусловленный дальним переносом атмосферных примесей уровень концентраций химических элементов в снеговом покрове фоновых районов и его широтную изменчивость. К нему, видимо, близки нижние границы рассеивания точек на графиках (см. рис. 4). Ориентируясь по ним, можно

предположить, что фоновая концентрация «аэрозольного» кальция в снеге варьирует на уровне от 800–1000 мкг/кг снега на юге – в степной зоне, понижаясь до 200–300 мкг/кг снега на севере – в подзоне северной тайги. Для магния эти значения лежат в пределах 300–400 на юге и 100–150 мкг/кг на севере. Для железа вероятно понижение от 100–200 мкг/кг на юге до 20–30 мкг/кг на севере, для стронция от 5–6 до 2–3 мкг/кг, для свинца от 1–1,5 до 0,3–0,5 мкг/кг, для кадмия – от 0,10 до 0,02 мкг/кг, для марганца от 8–10 до 1–2 мкг/кг, для цинка от 7–8 до 2–3 мкг/кг. Фоновая концентрация «аэрозольной» меди в снеговом покрове Западной Сибири, вероятно, составляет 0,5–1,5 мкг/кг.

Полученные данные о фоновых концентрациях химических элементов в снеге позволяют рассмотреть в сравнении с ними результаты ранее проведенных исследований. Например, на территории Алтайского края В.Е. Павловым с соавт. [12] была показана межгодовая устойчивость относительного распределения некоторых химических элементов по средним геометрическим концентрациям нерастворимой формы в снежном покрове. Выборки (*n*) В.Е. Павлова включали пробы со всей территории Алтайского края, без учета удаленности пунктов отбора проб от источников техногенных выбросов. Сравнение результатов В.Е. Павлова с нашими данными (табл. 5) выявило очень сильные различия, указывающие на то, что большая часть проб в выборках В.Е. Павлова характеризует именно импактные районы.

Таблица 5

Средние геометрические концентрации (С1, С2) нерастворимой формы химических элементов в снеге Алтайского края, мкг/кг

Элемент	С1, данные [12] (<i>n</i> = 160)	С2, наши данные (<i>n</i> = 13)	С1/С2
Sr	11	2,0	5,6
Pb	24	1,5	15,9
Cu	33	1,2	27,3
Zn	39	4,3	9,1
Mn	65	7,2	9,0
Ca	290	355,3	0,8
Fe	927	259,7	3,6

Средние геометрические концентрации сравниваемых элементов за исключением кальция в наших пробах с территории Алтайского края многократно меньше, чем в выборке В.Е. Павлова. Последовательность элементов по возрастанию их средних геометрических концентраций также несколько иная. Особенно велики различия по меди и свинцу, они свидетельствуют о наиболее сильном загрязнении именно этими элементами атмосферы и компонентов наземных ландшафтов в промышленных районах Алтайского края.

Заключение

Проведенные исследования позволили охарактеризовать изменчивость фоновых концентраций химических элементов в снеговом покрове центрального сектора Западной Сибири и связать ее с широтными изменениями природных и антропогенных факторов, влияющих на поступление примесей, в частности выявить влияние почвенного покрова, засоленных озер и распашки почв.

Обнаруженные тренды снижения концентраций многих химических элементов в снеге с юга на север Западной Сибири подтверждают выводы В.А. Казанцева [23] о зональности минерализации и химического состава атмосферных осадков Западной Сибири и соответствуют обобщениям, сделанным М.А. Глазовской [24]. Эти тренды наблюдаются не только для типичных «почвенно-эрозионных» химических элементов (Ca, Fe, Al, Sr), но и для считающихся «техногенными» V, Co, Pb, Zn, Cd, что не вполне соответствует данным, полученным при исследовании аэрозолей [13] и указывает на необходимость дальнейших исследований.

Ориентировочно выяснены верхние пределы фонового варьирования концентраций растворимой и нерастворимой форм химических элементов в снеге для природных зон Западной Сибири, их можно использовать при выявлении и оценке локального загрязнения.

Для получения более достоверных сведений о фоновом аэрозольном накоплении примесей в снеге за счет дальнего переноса на территорию Западной Сибири, особенно в степную и лесостепную ее части, необходимо внести коррективы в методику выполнения работ. Пункты отбора проб с целью минимизации загрязнения примесями неаэрозольного происхождения предпочтительнее располагать на ледовой поверхности пресных водоемов либо использовать емкости для сбора снега, установленные выше верхнего яруса растительности.

1. Calvo A.I., Alves C., Castro A., Pont V., Vicente A.M., Fraile R. Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues // Atmos. Res. 2013. V. 120–121. P. 1–28.
2. Pacyna J.M., Pacyna E.G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environ. Rev. 2001. V. 9, N 4. P. 269–298.
3. Андреева И.С., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Кокоркин В.В., Олькин С.Е., Петриченко В.А., Ратуна В.Ф., Резникова И.К., Сафатов А.С., Степанова Е.В. Оценка биогенных загрязнений в снежном покрове в окрестности Новосибирска // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 547–550.
4. Иванов А.О. Эколого-геохимическое состояние приземного слоя атмосферного воздуха г. Томска и Обь-Томского междуречья в 2006 г. (по итогам снеговой съемки) // Вестн. Том. гос. ун-та. 2007. № 298. С. 195–197.
5. Московченко Д.В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, 1998. С. 72–73.
6. Павлов В.Е., Суторихин И.А., Хвостов И.В., Зинченко Г.С. Снежный покров как индикатор загрязнения урбанизированной территории Алтайского края

- // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 96–100.
7. Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Шуваева О.В., Садовский А.П., Олькин С.Е., Резникова И.К., Морозов С.В. Мониторинг загрязнения снежного покрова в окрестностях автотрасс // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 11. С. 1031–1035.
 8. Сысо А.И., Артамонова В.С., Сидорова М.Ю., Ермолов Ю.В., Черевко А.С. Загрязнение атмосферы, снежного и почвенного покрова г. Новосибирска // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 663–669.
 9. Таловская А.Н. Оценка эколого-геохимического состояния г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т., 2008. 23 с.
 10. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т., 2001. 23 с.
 11. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т., 2006. 47 с.
 12. Павлов В.Е., Суторихин И.А., Хвостов И.В. Мезомасштабная устойчивость в распределении ряда химических элементов по концентрациям в снеговом покрове Алтайского края // Докл. РАН. 2006. Т. 406, № 4. С. 544–547.
 13. *Аэрозоли Сибири* / Отв. ред. К.П. Куценогий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с.
 14. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2010. № 1. С. 63–70.
 15. Таловская А.Н., Язиков Е.Г., Панченко М.В., Козлов В.С. Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 517–523.
 16. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы*. РД 52.04.186–89. М., 1991. 693 с.
 17. *Методические рекомендации по спектральному определению тяжелых металлов в биологических материалах и объектах окружающей среды* / [АМН СССР. Пробл. комис. союз. значения «Науч. основы гигиены окружающей среды» НИИ общ. и коммун. гигиены им. А.Н. Сысина, НИИ краев. патологии Минздрава КазССР]; [Разраб. д.х.н., проф. М.Т. Дмитриевым и к.ф.-м.н. Э.И. Грановским]. М.: Б.И., 1986. 52 с.
 18. Василевич М.И. Формирование химического состава снежного покрова в таежной зоне Европейского северо-востока России: Дис. ... канд. биол. наук. М.: Ин-т биол. УО РАН, 2009. 160 с.
 19. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П. Особенности формирования ионного состава снежного покрова в прибрежной зоне западного сектора арктических морей России // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.scienceeducation.ru/106-7843>
 20. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 225 с.
 21. Snyder-Conn E., Garbarino J.R., Hoffmann G.L. Soluble Trace Elements and Total Mercury in Arctic Alaskan Snow // Arctic. V. 50, N 3. P. 201–215.
 22. Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А., Богуславский А.Е. Фоновые значения некоторых геохимических параметров снега на территории Западной Сибири (от подтайги до лесотундры) // Сб. научн. трудов «Биологические ресурсы и природопользование». Вып. 11. Сургут: Дефис, 2008. С. 288–297.
 23. Казанцев В.А. О зональности минерализации и химического состава атмосферных осадков в Западной Сибири и некоторые вопросы солепереноса // Особенности мелiorации земель Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1979. С. 113–116.
 24. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988. С. 42.
 25. Евсеева Н.С. Цикличность проявления дефляции почв холодного периода года в агроландшафтах юго-востока Западно-Сибирской равнины // Вестн. Том. гос. ун-та. 2005. № 15. С. 168–170.
 26. Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Осинцева Н.В., Ромашова Т.В. Интенсивность эоловых процессов в холодный период года на пашне юга Томской области и их геохимический аспект // Геогр. и природ. ресурсы. 2003. № 3. С. 101–105.

Yu. V. Ermolov, I. D. Makhatkov, S. A. Khudyaev. Background concentration of chemical elements in snow cover of the typical regions of the Western Siberia.

Variability of concentration of chemical elements in snow cover of the typical regions of the central part of the Western Siberia is studied. Decrease of variability and concentration of chemical elements has been found in the south-north direction. This tendency is observed not only for “soil-erosion” elements (Ca, Fe, Al, Sr), but also for those considered “technogeneous” – V, Co, Pb, Zn, Cd. Northward decrease of concentrations is the most pronounced between the steppe and southern taiga zones.