

# СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.578.46 (571.56)

doi: 10.31857/S2076673420040056

## Отрицательные аномалии редокс-потенциала в снежном покрове селитебных зон (на примере г. Якутск)

© 2020 г. В.Н. Макаров

Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия  
vnmakarov@mpi.ysn.ru

## Negative anomalies of the redox (reduction-oxidation) potential in the snow cover of residential areas (Yakutsk as an example)

V.N. Makarov

Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia  
vnmakarov@mpi.ysn.ru

Received January 31, 2020 / Revised April 27, 2020 / Accepted June 10, 2020

**Keywords:** ecology, geochemistry, oxygen, redox potential, residential areas, snow cover.

### Summary

One of the significant environmental factors of the environments of Northern cities is the specificity of the oxygen regime of the atmosphere. The main air pollutants and oxygen absorbents are industrial enterprises and automobile transport. Snow cover serves as a natural accumulator of precipitation and other fall-outs from the atmosphere and, thus, an indicator of atmospheric pollution. The constancy of the ratio of oxygen in the atmospheric air and snow cover allows us qualitative assessing of the change in the concentration of oxygen in the atmosphere during the cold season by the value of the redox potential-Eh of snowmelt waters. In the second half of March 2016–2019, a geochemical study of snow cover was conducted on the territory of the city of Yakutsk and its environs. In areas of the city with a high level of air pollution, the presence of negative anomalies of the redox potential of the snow cover – melt snow waters had been established. It was found that the greatest influence on the decrease in the Eh value of snowmelt water is exerted by dustiness of the air, and the content of chlorides and carbonates. These negative anomalies of the redox potential in snowmelt waters on the territory of the city are associated with technogenic areas of macro- and micro-components of the snow chemical composition, alkaline pH values, and dust emissions into the atmosphere. On the territory of Yakutsk, the values of the redox potential of the snow cover decrease, on average, by 134 mV relative to the background values, while in the areas where polluting objects are located – by 200–250 mV.

**Citation:** Makarov V.N. Negative anomalies of the redox (reduction-oxidation) potential in the snow cover of residential areas (Yakutsk as an example). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020. 60 (4): 513–520. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420040056.

Поступила 31 января 2020 г. / После доработки 27 апреля 2020 г. / Принята к печати 10 июня 2020 г.

**Ключевые слова:** геохимия, кислород, редокс-потенциал, селитебные зоны, снежный покров, экология.

Установлено формирование отрицательных аномалий редокс-потенциала в снежном покрове селитебных зон. В талых водах снежного покрова эти аномалии чётко коррелируют с загрязнителями окружающей среды и могут использоваться для оценки санитарного состояния зимней атмосферы селитебных и промышленных зон.

### Введение

В городской атмосфере существует много факторов, негативно влияющих на здоровье человека: более высокая (относительно окружающей территории) температура воздуха, загрязнённость атмосферы газами (оксидами углерода

и азота, диоксидами серы) и взвешенными частицами. Один из важнейших факторов для здоровья горожан – содержание кислорода в атмосферном воздухе. В привычной для нас обстановке объёмное содержание кислорода в атмосфере составляет около 21%. Как человек, так и животные чутко реагируют даже на незначительное уменьшение в

атмосфере кислорода: в их поведенческих реакциях наблюдается ослабление жизненных функций. Длительное пребывание организма в среде с пониженным парциальным давлением кислорода вызывает ряд приспособленческих сдвигов функций дыхания, что вызывает компенсаторные перестройки организма [1, 2]. Для приполярных районов Сибири и Дальнего Востока существует специфика кислородного режима атмосферы, известная как синдром «полярного напряжения» [3] или «полярная гипоксия» [4]. Именно поэтому важно иметь представление о концентрации кислорода в атмосфере северных селитебных зон, когда ослабление жизненных функций организма, связанное с природной спецификой кислородного режима атмосферы, часто возрастает из-за «кислородного голодания», вызванного техногенным воздействием.

Величина редокс-потенциала природных вод (талой снеговой воды) зависит в основном от содержания в атмосферном воздухе важнейшего окислителя – кислорода. Зная концентрацию кислорода в зимнем атмосферном воздухе селитебных и промышленных зон северных районов, а следовательно, и санитарное состояние атмосферы, можно установить величину редокс-потенциала (окислительно-восстановительного потенциала) –  $E_h$  снежного покрова. Цель настоящего исследования – изучение возможности использования показателей редокс-потенциала снежного покрова для оценки специфики кислородного режима атмосферы северного города (Якутск), вызванного техногенным воздействием.

### Методы исследования

Пробы снега для геохимических исследований отбирали на территории г. Якутск и в его окрестностях во второй половине марта 2016–2019 гг. до начала снеготаяния. Пробы, взятые с помощью цилиндрического стеклянного пробоотборника (без снятия 1,5 см снега у почвы) помещали в полиэтиленовые пакеты. В каждом пункте проводили 5–6 измерений толщины снега, определялась также его плотность, измерялась температура воздуха и снега (на поверхности и на почве). Пробы поступали в лабораторию ежедневно после отбора. Плавление проб вели при комнатной температуре 20 °С непосредственно перед анализом. Химический анализ снеговой воды выполнен в лабо-

ратории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова и О.В. Шепелева). Редокс-потенциал измеряли электродом ЭРП-101 на ионометрическом преобразователе И-500 (ЗАО КРИСМАС+). Диапазон измерений  $E_h$  – от –2000 до +2000 мВ, дискретность показателей – 0,1 мВ, абсолютная погрешность –  $\pm 0,7$  мВ.

### Описание района

Город Якутск расположен в среднем течении р. Лена, в широкой долине Туймаада, и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Это – крупнейший и старейший город в мире, лежащий в сплошной криолитозоне. В настоящее время город активно развивается. Если в 2000 г. в численность населения составляла 195 тыс., то в 2020 г. она увеличилась до 328 тыс. Основные отрасли экономики, загрязняющие атмосферу на территории города, – жилищно-коммунальное хозяйство, транспорт и промышленность. Объём выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в Якутске составляет около 13 тыс. т в год, от транспорта – примерно 34 тыс. т в год. В северной и южной частях города находятся промышленные, жилищно-коммунальные, топливно-энергетические и сельскохозяйственные предприятия. Наиболее загрязнён воздух в северном промышленном районе, где, помимо интенсивного движения автотранспорта, значительный вклад вносят предприятия теплоэнергетики и индустрии.

Планировочная структура города – радиально-кольцевая. Частая сетка улиц образует значительное число небольших по площади кварталов (от 2 до 8 га). Проезжая часть улиц в основном приподнята. Характер застройки – неровный: на окраинах города это преимущественно одно- и двухэтажные строения, в центральной части – капитальная застройка каменными зданиями от 4–5 до 9–16 этажей.

### Результаты и обсуждение

Оценка относительного содержания кислорода в зимней атмосфере города выполнена путём определения величины редокс-потенциала снежного покрова. Кислород – основной потенциалзадающий компонент талых снеговых вод. Постоянство

Таблица 1. Газовый состав градин, снега и атмосферного воздуха

Объект	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	Ar/N <sub>2</sub>	Источник
Градины (Швейцария)	0,0200	0,293	0,0154	[10]
	0,0175	0,297	0,0164	
Снег, Антарктида	Не опр.	0,263	0,0118	[11]
Атмосфера	0,0038	0,268	0,0120	[12]

соотношения кислорода в атмосферном воздухе и снежном покрове позволяет оценить изменение концентрации O<sub>2</sub> в атмосфере по величине Eh снега. На территории Якутска отрицательные аномалии величины Eh (недостаток кислорода) хорошо идентифицируются с источниками загрязнения атмосферы и фиксируются на локальных площадях, приуроченных к промышленным предприятиям и частично к жилым кварталам.

Снег загрязняется уже в процессе своего образования, а затем при выпадении, когда снежинки захватывают и осаждают газы, аэрозольные и пылевые частицы взвешенных веществ из атмосферы. Снежный покров как естественный накопитель даёт действительную величину сухих и влажных выпадений в холодный сезон и может служить индикатором атмосферного загрязнения соединениями серы, азота, тяжёлыми металлами и другими компонентами [5–7]. В снежном покрове вокруг источников загрязнения воздуха (городов и промышленных центров) формируются комплексные геохимические аномалии. Предполагается, что в твёрдых атмосферных осадках растворено лишь незначительное количество воздуха. Однако известно, что сросшиеся кристаллы снега или кристаллы, происходящие из замёрзших капелек воды, могут содержать довольно высокие концентрации газообразных составляющих [8].

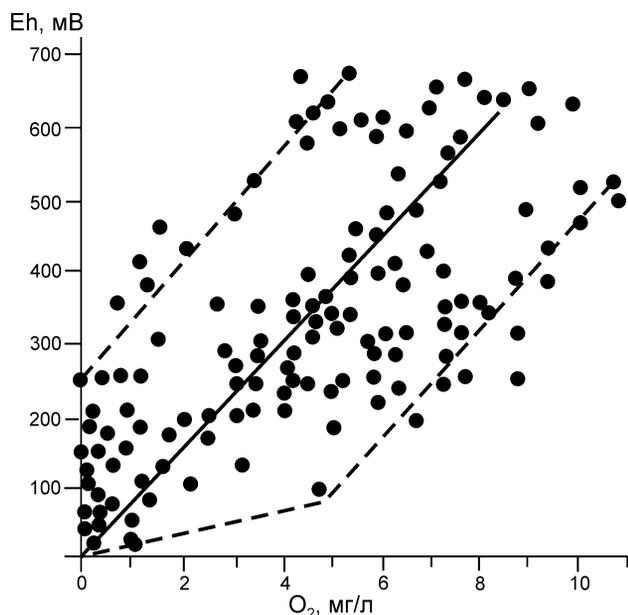
По мнению С. Мацуо и Я. Мияки [9], атмосферный воздух, растворённый в переохлаждённых водяных каплях, на контакте с ледяной поверхностью более других газов обогащён CO<sub>2</sub> и Ar и полностью заключён в ледяных кристаллах, поскольку переохлаждённые капли образуют их ядра. Измерения показали, что суммарное газовое содержание в снежных осадках невелико – порядка 1 млн на 1 кг. Газовая смесь обогащена углекислым газом [10]. В то же время соотношение кислорода и азота в снеге и атмосферном газе остаётся близким. Этот вывод подтверждают и результаты измерений образцов снега, взятых в Восточной Антарктиде (табл. 1).

Таблица 2. Содержание основных окислителей в атмосферных осадках промышленных городов и Якутска

Компоненты	Единицы измерения	Якутск	Промышленные города [13]	
			Пасадена, США	Стоктон-он-Тис, Великобритания
Население	тыс. чел.	328	135	290
H <sub>2</sub> S	мг/м <sup>3</sup>	0,01	Не опр.	
Fe		1,218	3,2	1,7
Mn		0,050	0,03	0,1
V		0,022	0,01	0,02
Cr		0,009	Не опр.	0,008
H <sup>+</sup>	мг-моль/м <sup>3</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>	Не опр.	
pH		7,69		

Основываясь на данных о сохранении соотношения кислорода в атмосферном воздухе и газах снежного покрова, автор попытался качественно оценить концентрации кислорода в атмосфере в течение холодного времени года по изменению величины редокс-потенциала снежного покрова Якутска – относительно большого северного города с продолжительностью устойчивого снежного покрова 6,5 мес. Редокс-потенциал природных вод (талой снеговой воды) изменяется в районе Якутска в интервале 340–587 мВ и зависит преимущественно от содержания в атмосферном воздухе важнейшего окислителя – кислорода, так как концентрации других окислителей незначительны.

Существующее в атмосферном воздухе г. Якутск содержание сероводорода – около 0,01 (до 0,0072) мг/м<sup>3</sup> – не влияет на понижение редокс-потенциала. Концентрации других окислителей (H, Fe, Mg и V) в атмосфере города относительно высоки (на уровне промышленных объектов, например, таких, как г. Стоктон-он-Тис в Великобритании, расположенный в пределах индустриальной территории, и г. Пасадена в США, известного высоким уровнем смога [13]), но недостаточны, чтобы повлиять на понижение величины Eh (табл. 2). Поэтому основным потенциалзадающим компонентом, определяющим окислительную обстановку среды в Якутске, служит кислород. Известно (В.В. Щербаков, 1968 г.) об увеличении положительных значений Eh с ростом содержания кислорода [14]. Между содержанием кислорода в природных водах и редокс-потенциалом наблюдается функциональная зависимость (рис. 1). Редокс-потенциал в снежном покрове города изменяется от 340



**Рис. 1.** Зависимость редокс-потенциала Eh от содержания кислорода O<sub>2</sub> в природных водах г. Якутск [14]  
**Fig. 1.** Dependence of the redox potential Eh on the oxygen content O<sub>2</sub> in natural waters [14] of the city of Yakutsk

до 508 мВ. Фоновая концентрация значений Eh снега в окрестностях Якутска (долина Туймаада) за пределами техногенного воздействия составляет 579–587 мВ, в среднем – 583 мВ (табл. 3).

Для анализа большого объёма фактического материала, объективной оценки взаимосвязи Eh с химическим составом снежного покрова и повышения эффективности интерпретации полученных данных применялся факторный анализ – один из методов многомерной математической статистики. Были поставлены следующие задачи: 1) классификация признаков, т.е. химических элементов и соединений, связанных с величиной редокс-потенциала; 2) представление математической модели, т.е. уравнений, описывающих факторы (природные или антропогенные компоненты) по признакам; 3) основная задача – идентификация факторов на основании интерпретации факторных решений. Предварительное решение выполнено с помощью метода главных компонент. Затем эти решения уточнялись методом максимального правдоподобия и проверялась статистическая значимость получаемого решения как по числу оцениваемых факторов, так и по надёжности получаемого решения (для факторного решения был задан 99%-ый уровень значимости). По результатам факторного анализа проведена клас-

**Таблица 3.** Химический состав снежного покрова в г. Якутск и его окрестностях (2015–2016 гг.)

Показатели	Единицы измерения	Город, n = 40*			Окрестности (фон), n = 6		
		min	max	mean	min	max	mean
pH		5,88	7,86	6,80	5,85	6,12	6,07
Eh	мВ	340	508	449	579	587	583
Минерализация	мг/л	13,0	193,0	55,0	8,31	9,54	9,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		5,50	48,6	11,49	6,76	7,73	7,15
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0,20	14,4	3,10	0,33	0,91	0,54
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,07	8,60	2,14	0,20	0,80	0,60
Fe <sup>3+</sup>		0,05	0,3	0,14	<i>&lt; 0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>&lt; 0,05</i>
Mn <sup>4+</sup>	мкг/л	0,5	538,0	2,5	<i>&lt; 0,3</i>	12,0	<i>&lt; 0,3</i>
Cr		0,1	15,0	1,4	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>
Mo		0,1	8,0	0,7	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>
V		0,1	5,0	0,16	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>	<i>&lt; 0,1</i>

\*n – число проб. Курсивом выделены концентрации ниже чувствительности анализа.

**Таблица 4.** Классификация химических компонентов и соединений (пыли и растворимой фазы снега) в зависимости от степени их корреляции с Eh\*

Фактор	II класс (≥-0,5)	III класс (≤0,5)	IV класс (≤-0,5)
1	Рм, К, Na, Cl, Mg, Ca, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub>	–	NH <sub>4</sub> , Pb, pH
4	pH, Cu	Cl, Zn, Mo, Na	–

\*Прочерки – отсутствие в данном факторе химических элементов.

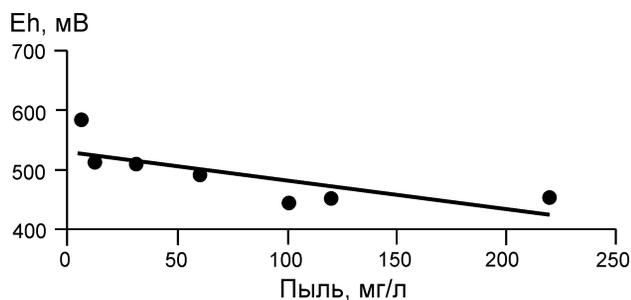
сификация признаков по их зависимости от степени корреляции Eh с факторами (табл. 4).

Выполненная классификация зависимости признаков от Eh показала отсутствие сильных положительных и преобладание значимых отрицательных корреляционных связей редокс-потенциала с макрокомпонентами химического состава растворимой фазы снежного покрова, величиной pH, Cu и особенно чёткую отрицательную корреляцию с запылённостью снега (воздуха). Соотношение между Eh и содержанием пыли в снежном покрове города показано на рис. 2.

Признаки химических элементов, имеющих наиболее сильные связи с Eh, группируются во II классе (факторы 1 и 4) и имеют вид следующих уравнений:

фактор 1 (факторный вес 26,5%) = -Рм, К (0,81) - Cl (0,75) - Na (0,70) - Mg, Ca (0,65) - HCO<sub>3</sub> (0,61) - SO<sub>4</sub> (0,58) - NO<sub>2</sub> (0,52) + Eh (0,38);

фактор 4 (факторный вес 8,9%) = -pH (0,65) - Cu<sup>2+</sup> (0,51) + Eh (0,39).



**Рис. 2.** Соотношение между редокс-потенциалом Eh и содержанием пыли в снежном покрове г. Якутск

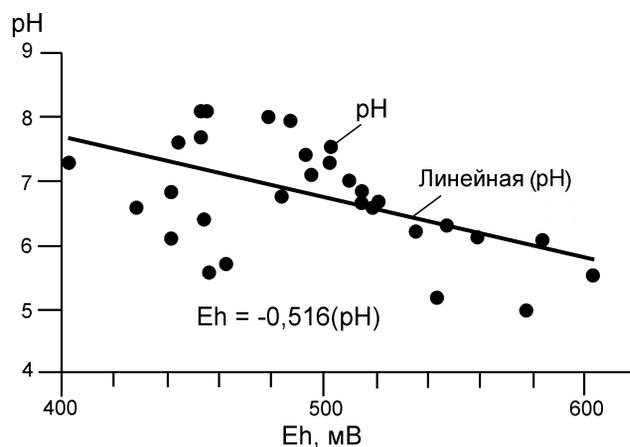
**Fig. 2.** The relationship between redox potential Eh and the dust content in the snow cover of the city of Yakutsk

Интерпретация факторных решений позволяет сделать следующие выводы.

1. Фактор 1 (факторный вес 26,5%) содержит компоненты, имеющие сильные отрицательные корреляционные связи с редокс-потенциалом: запылённость воздуха и комплекс макрокомпонентов (анионов и катионов), определяющих химический состав снежного покрова, а также компоненты с более слабыми отрицательными корреляционными связями с Eh: аммоний, Pb и величина рН (водород).

2. Величина редокс-потенциала в талых водах снежного покрова имеет чёткие отрицательные корреляционные связи с перечисленными компонентами (см. табл. 4). Поскольку величина Eh зависит главным образом от содержания кислорода, то очевидна явная зависимость между повышением концентрации в атмосфере и снежном покрове загрязняющих компонентов (в газовой, аэрозольной и пылевой фазах) и уменьшением Eh (концентрации  $O_2$ ).

3. В фактор 4 (факторный вес 8,9%), как и в фактор 1, входят компоненты, имеющие сильные отрицательные связи с Eh – показатель рН и Си. Хотя Си не относится к приоритетным загрязнителям атмосферы Якутска, её присутствие в воздухе, по-видимому, влияет на понижение концентрации кислорода. Отрицательная корреляция рН/Eh указывает на существующую взаимосвязь между повышением рН (уменьшением свободных ионов водорода  $H^+$ ) и снижением количества  $O_2$  в атмосферном воздухе. В районах города с высоким уровнем техногенного воздействия, обусловленным пылевым, преимущественно карбонатным загрязнением, наблюдается повышенная щёлочность снежного



**Рис. 3.** Зависимость между редокс-потенциалом Eh и показателем кислотности-щелочности рН в снежном покрове г. Якутск

**Fig. 3.** Dependence between redox potential Eh and indicator of acidity-alkalinity pH in the snow cover of the city of Yakutsk

покрова [7]. Поэтому понятна отрицательная корреляция между величинами Eh и рН, которая показана на рис. 3.

Показательно совпадение отрицательных аномалий редокс-потенциала и полей распространения щелочных значений рН с местонахождением основных объектов загрязнения воздушного бассейна города. Расположение отрицательных аномалий Eh совпадает с техногенными полями комплекса основных макро- и микрокомпонентов химического состава талых снеговых вод, источник которых – поступление загрязнителей из атмосферы. Очевидно, что в этих районах города будет наблюдаться пониженное содержание кислорода в атмосфере.

Корреляционный анализ показал наличие значимой отрицательной связи редокс-потенциала с пылевыми выбросами Рм (см. рис. 2). Показатель Рм – плотность техногенного загрязнения [6] – фиксирует суммарное количество пылевых выбросов в атмосферу. Интересно проследить не только суммарное воздействие пылевого загрязнения, но и влияние присутствующих в пыли микроэлементов на понижение величины Eh (концентрации  $O_2$ ). Как и для растворимой фазы, была проведена классификация признаков – химических элементов в пылевой фазе снега в зависимости от степени их корреляции с величиной Eh (табл. 5). Признаки химических элементов, присутствующих в пы-

Таблица 5. Классификация химических элементов (в пылевой фазе снега), имеющих корреляционные связи с Eh\*

Фактор	I класс (≥ 0,5)	II класс (≥ -0,5)	III класс (≤ 0,5)	IV класс (≤ -0,5)
2	Sr	Mn, Pb	La, Be, Y	Zn, Ti, Cr, Cu
4	Cu, Sn, Ag	–	Ti	Sb, Ga, Pm
5	Sn, Zn	Cd	–	–
9	–	–	Sb, Zn	Mo, Ni

\*Прочерки – отсутствие в данном факторе химических элементов.

левой фазе снега и имеющих сильные корреляционные связи с величиной Eh, группируются в I и II классах (ведущих по величине факторного веса) и имеют вид следующих уравнений:

фактор 2 (факторный вес 12,7%) = Sr (0,65) + Eh (0,63) + La (0,49) + Be, Y (0,29) – Mn (0,59) – Pb (0,55) – Zn, Ti (0,40) – Cu (0,38) – Cr (0,31);

фактор 4 (факторный вес 7,7%) = Cu (0,59) + Sn (0,55) + Ag (0,52) + Eh, Ti (0,29) – Sb (0,40) – Ga (0,30) – Pm (0,31);

фактор 5 (факторный вес 6,2%) = Sn (0,54) + Zn (0,51) + Eh (0,40) – Cd (0,50);

фактор 9 (факторный вес 3,8%) = Sb, Zn (0,30) – Eh (0,35) – Mo (0,32) – Ni (0,30).

Среди выделенных факторов, содержащих редокс-потенциал, наиболее сильные значимые связи с величиной Eh имеет только фактор 2, для которого высокие факторные нагрузки соответствуют комплексу элементов с положительными и отрицательными связями с Eh. Среди первых – Sr (наиболее сильная значимая связь), а также La, Be и Y; в составе вторых – Mn и Pb (значимая отрицательная корреляция), а также Zn, Ti, Cr, Cu. Преобладание положительных связей с литофильными элементами (Sr, La, Be и Y), входящими в состав породообразующих пород и имеющими невысокие концентрации в атмосферной пыли, отражает незначительное воздействие их присутствия в атмосфере на величину Eh (содержание O<sub>2</sub> в воздухе города). Другая группа микроэлементов, относящаяся к фактору 2, характеризуется сильными отрицательными корреляционными связями с Eh. Эта группа – преимущественно халько- и литофильные элементы, в основном тяжёлые металлы, – весьма специфична. Накопление таких металлов в снежном покрове города в десятки и сотни раз выше фоновых значений для Якутии [7]. Их концентрации в пылевой фазе снежного покрова достигают значений, превышающих санитарные нормы для почв (табл. 6).

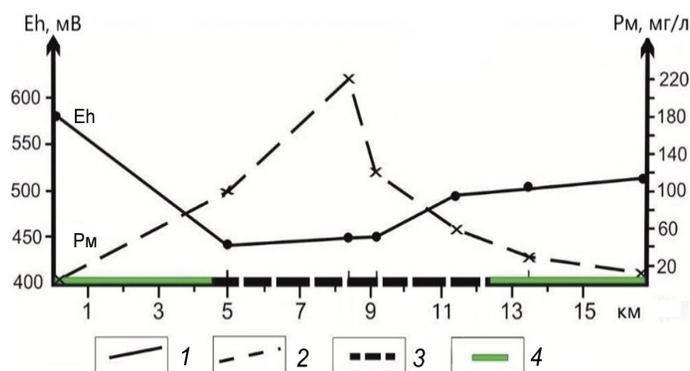
Таблица 6. Концентрация химических элементов фактора 2 в атмосферной пыли г. Якутск, мг/кг

Тяжёлые металлы	Mn	Pb	Zn	Ti	Cu	Cr	Источник
C <sub>mean</sub>	680	253	151	1800	79	98	[15]
C <sub>max</sub>	7000	1500	4000	10 000	2000	700	
ПДК <sub>почв</sub>	1500	32	150	5000	30	100	[16]

Практически все химические элементы, входящие в фактор 2, кроме Ti, относятся к активным загрязнителям атмосферного воздуха Якутска, формируют контрастные техногенные аномалии в снежном покрове и почвах города и тесно связаны с объектами загрязнения природной среды. Отрицательные корреляционные связи этой группы микроэлементов с величиной Eh однозначно указывают на зависимость понижения концентрации O<sub>2</sub> в атмосфере в зонах интенсивного техногенного давления не только под воздействием газового и аэрозольного загрязнения, но и пылевых выбросов с высоким содержанием халькофильных элементов, прежде всего Mn и Pb. Городская территория по сравнению с окрестностями выделяется пониженными значениями Eh и аномальными концентрациями пыли в снежном покрове (рис. 4).

Отрицательные аномалии редокс-потенциала приурочены к промышленным районам Якутска с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха: северным – Марха-аэропорт, ГРЭС-ЯТЭЦ; южным и юго-западным – домостроительный комбинат, птицефабрика–племхоз–помётохранилище (рис. 5). Это – районы распространения комплексных техногенных геохимических аномалий, охватывающих все природные среды – атмосферу, гидросферу, почвы и растительность.

Отрицательные аномалии Eh (дефицит O<sub>2</sub>) отмечаются и в некоторых жилых кварталах Якутска. Учитывая повышенную загрязнённость городской среды [17], дополнительный отрицательный фактор, связанный с пониженной концентрацией кислорода, значительно ухудшает санитарную обстановку в селитебной зоне города. Во время редких оттепелей при циклонах, когда потеплению сопутствуют понижение атмосферного давления и повышение влажности, количество кислорода снижается и усугубляется кислородная недостаточность у больных, страдающих сердечно-сосудистой и лёгочной недостаточностью.



**Рис. 4.** Соотношение редокс-потенциала Eh и концентрации пыли Pm в снежном покрове.

Геохимический разрез в районе г. Якутск (2017 г.): 1 – величина Eh, мВ; 2 – концентрации пыли Pm, мг/л; районы города: 3 – жилые и промышленные, 4 – окрестности

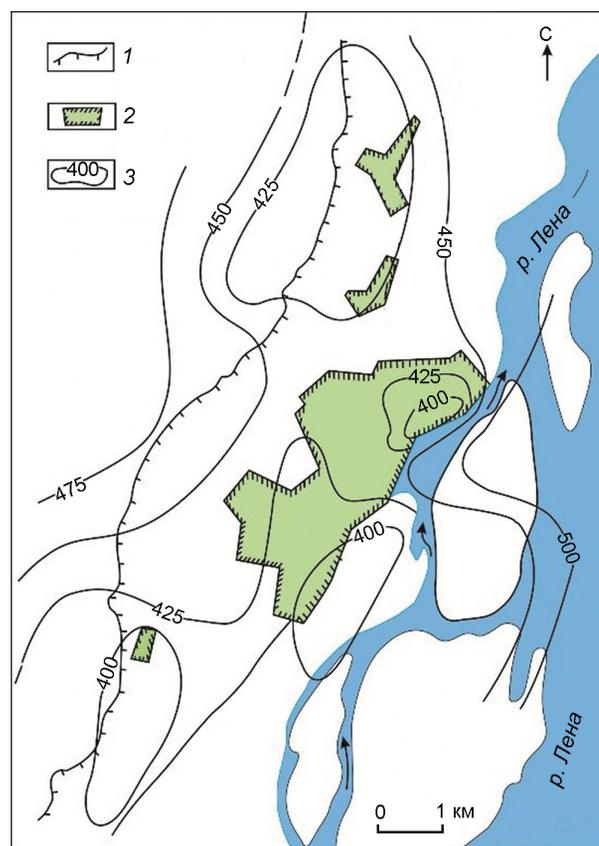
**Fig. 4.** The ratio of redox potential Eh and dust concentration Pm in the snow cover.

Geochemical section in the region of Yakutsk (2017): 1 – value of Eh, mV; 2 – dust concentration Pm, mg/l; city districts: 3 – residential and industrial, 4 – neighborhoods

стью [1, 18]. Но и в холодное время года, когда преобладает термический и ветровой режим Сибирского антициклона, высокое атмосферное давление, повышенная концентрация кислорода и незначительные перепады его содержания в воздухе, в организме начинают преобладать спастические (сосудосуживающие) реакции. В этих условиях некоторый недостаток кислорода в воздухе, вероятно, может быть благоприятным для людей, страдающих гипертонической, желчно- и мочекаменной болезнями, спастическим колитом.

### Заключение

Существенный экологический фактор состояния окружающей среды северных городов – специфика кислородного режима атмосферы. Постоянство соотношения кислорода в атмосферном воздухе и снежном покрове позволяет качественно оценить экологическую ситуацию по величине редокс-потенциала талых снеговых вод. На территории Якутска наблюдается существенное понижение величины Eh снега: в среднем на 200–230 мВ по сравнению с фоновыми значениями. Это свидетельствует об уменьшении содержания кислорода в атмосфере. Формирование отрицательных аномалий редокс-потенциала снежного покрова тесно связано с геохимическими показателями загрязнения окружа-



**Рис. 5.** Аномалии редокс-потенциала Eh в снежном покрове г. Якутск:

1 – коренной склон долины р. Лена; 2 – городские районы; 3 – изолинии величины Eh, мВ

**Fig. 5.** Anomalies of the redox potential Eh in the snow cover of Yakutsk:

1 – the root slope of the river valley Lena; 2 – urban areas; 3 – isolines of the value of Eh, mV

ющей среды: техногенными аномалиями халькофильных элементов в растворимой и твёрдой фазах снега и пылевым загрязнением. Отрицательные аномалии редокс-потенциала снежного покрова приурочены к конкретным объектам-загрязнителям. Они хорошо идентифицируются с источниками загрязнения атмосферы и комплексными техногенными геохимическими ореолами, приурочены главным образом к промышленным предприятиям, но охватывают и прилегающие жилые кварталы.

Определение техногенной загрязнённости по отрицательным аномалиям редокс-потенциала в снежном покрове даёт дополнительную возможность комплексной оценки экологического состояния зимней атмосферы жилых и промышленных городских районов.

## Литература

## References

1. Овчарова В.Ф. Климат и здоровье человека // Тр. Междунар. симпозиума ВМО/ВОЗ/ЮНЕП СССР (Ленинград, 22–26.09.1986). Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 88–89.
2. Петров В.Н. Особенности влияния парциально-го градиента плотности кислорода в атмосферном воздухе на состояние здоровья населения, проживающего в арктической зоне РФ // Вестн. Кольского науч. центра РАН. Естественные и технические науки. 2015. № 3 (22). С. 82–92.
3. Казначеев В.П. Клинические аспекты полярной медицины. М.: Медицина, 1986. 205 с.
4. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Марачев А.Г., Милованов А.П. Патология человека на Севере. М.: Медицина, 1985. 415 с.
5. Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G., Ilgasheva E.O., Baglaeva E.M., Ryanskaya A.D., Kiseleva D.V., Gulyaeva T.Ya. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment. *Nature Scientific Reports*. 2019. № 9. 17241.
6. Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 73–80.
7. Макаров В.Н., Федосеева В.И., Федосеев Н.Ф. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1990. 152 с.
8. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2006. 1248 p.
9. Matsuo S., Miyake Y. Gas composition in ice samples from Antarctica // *Journ. of Geophys. Research*. 1966. V. 71. № 22. P. 5235–5241.
10. Stauffer B., Berner W. CO<sub>2</sub> in natural ice // *Journ. of Glaciology*. 1978. V. 21. № 85. P. 291–300.
11. Raynaud D., Delmas R.J. Composition des gaz contenus dans la glace polaire. Isotopes et Impuretés dans les Neiges et Glaces: Actes du Colloque de Grenoble. 1977. № 118. P. 377–381.
12. Mason B. *The Principles of Geochemistry*. 3<sup>rd</sup> Ed. New York, London: Wiley, 1966. 329 p.
13. Spedding D.J. *Air Pollution*. Oxford: Clarendon Press, 1974. 76 p.
14. Щербakov В.В. Основы геохимии. М.: Недра, 1972. 296 с.
15. Макаров В.Н. Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне (на примере Якутска) // Региональная экология. 2016. № 4 (46). С. 7–21.
16. СанПиН 2.1.7.2197–07. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. С изменениями и дополнениями от 25.04.2017 г. М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2007. 9 с.
17. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2014 г. Правительство РС(Я), М-во охраны природы РС(Я). Ижевск: ООО «Принт», 2015. 304 с.
18. Замолодчиков Д.Г. Кислород – основа жизни // Вестн. РАН. 2006. Т. 76. № 3. С. 209–218.
1. Ovcharova V.F. *Klimat i zdorov'ye cheloveka. Climate and human health. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma VMO/VOZ/YUNEP SSSR (Leningrad, 22–26.09.1986)*. Proc. of the Intern. Symposium WMO/VOZ/YUNEP USSR (Leningrad, 22–26.09.1986). V. 2. L.: Hydrometeoizdat, 1988: 88–89. [In Russian].
2. Petrov V.N. Features of the influence of the partial gradient of oxygen density in atmospheric air on the health status of the population living in the Arctic zone of the Russian Federation. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. Yestestvennye i tekhnicheskie nauki*. Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Natural and technical sciences. 2015, 3 (22): 82–92. [In Russian].
3. Kaznacheyev V.P. *Klinicheskiye aspekty polarnoy meditsiny*. Clinical aspects of polar medicine. Moscow: Meditsina, 1986: 205 p. [In Russian].
4. Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Marachev A.G., Milovanov A.P. *Patologiya cheloveka na Severe*. Human pathology in the North. Moscow: Meditsina, 1985: 415 p. [In Russian].
5. Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G., Ilgasheva E.O., Baglaeva E.M., Ryanskaya A.D., Kiseleva D.V., Gulyaeva T.Ya. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment. *Nature Scientific Reports*. 2019, 9: 17241.
6. Makarov V.N. *Geokhimiya snezhnogo pokrova tayozhnykh i gornykh merzlotnykh landshaftov Yakutii. Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 73–80. [In Russian].
7. Makarov V.N., Fedoseyeva V.I., Fedoseyev N.F. *Geokhimiya snezhnogo pokrova Yakutii*. Geochemistry of the snow cover of Yakutia. Yakutsk: Institut Merzlotovedeniya SO RAN, 1990: 152 p. [In Russian].
8. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2006: 1248 p.
9. Matsuo S., Miyake Y. Gas composition in ice samples from Antarctica. *Journ. of Geophys. Research*. 1966, 71 (22): 5235–5241.
10. Stauffer B., Berner W. CO<sub>2</sub> in natural ice. *Journ. of Glaciology* 1978, 21 (85): 291–300.
11. Raynaud D., Delmas R.J. Composition des gaz contenus dans la glace polaire. Isotopes et Impuretés dans les Neiges et Glaces: Actes du Colloque de Grenoble. 1977, 118: 377–381.
12. Mason B. *The Principles of Geochemistry*. 3rd Ed. New York, London: Wiley, 1966: 329 p.
13. Spedding D.J. *Air Pollution*. Oxford: Clarendon Press., 1974: 76 p.
14. Shcherbakov V.V. *Osnovy geokhimii*. Fundamentals of Geochemistry. Moscow: Nedra, 1972: 296 p. [In Russian].
15. Makarov V.N. *Ekogeokhimiya okruzhayushchey sredy goroda, raspolozhennogo v kriolitozone (na primere Yakutsk)*. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2016, 4 (46): 7–21. [In Russian].
16. СанПиН 2.1.7.2197–07. *Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k kachestvu pochvy. Sanitarno-epidemiologicheskiye pravila i normativy. S izmeneniyami i dopolneniyami ot 25.04.2017*. Sanitary and epidemiological requirements for soil quality. Sanitary and epidemiological rules and regulations. With changes and additions from 04.25.2017. Moscow: Ministerstvo zdavoookhraneniya Rossiyskoy Federatsii, 2007: 9 p. [In Russian].
17. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2014 g.* State report on the state and environmental protection of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2014. Government of the Republic of Sakha (Yakutia), Ministry of Nature Protection of the RS (Ya). Izhevsk: ООО «Print», 2015: 304 p. [In Russian].
18. Zamolodchikov D. G. Oxygen is the basis of life. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2006, 76 (3): 209–218. [In Russian].