

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 551.577.13

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

© 2011 г. М. И. Василевич, В. А. Безносиков, Б. М. Кондратенко

*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения*

*Российской академии наук*

*167982 Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28*

Поступила в редакцию 13.04.2010 г.

Проведен количественный химический анализ снежного покрова на фоновых территориях южной, средней и северной тайги Республики Коми. Снежный покров таежной зоны европейского северо-востока России (Республика Коми) характеризуется низкой минерализацией и кислой реакцией среды. Кислотность талой воды обусловлена преобладанием сильных минеральных кислот и дефицитом нейтрализующих соединений. Выявлена статистически достоверная широтная дифференциация в распределении макро- и микроэлементов в снеге с юга на север.

*Ключевые слова:* снежный покров, количественный химический анализ, широтная дифференциация макро- и микроэлементов, факторный анализ.

Поступление веществ из атмосферы играет важную роль в геохимическом балансе экосистем. Атмосфера участвует в обмене и перераспределении вещества на Земле, а ее химический состав дает объективную информацию о качестве воздушной среды [18]. Выпадение химических элементов из атмосферы в виде осадков на подстилающую поверхность и их состав – актуальная национальная и международная проблема [4, 10].

Снежный покров выступает эффективным накопителем веществ, которые сохраняются в нем в неизменном состоянии в течение зимы, а его химический состав отражает действительную величину сухих и влажных выпадений и служит количественной характеристикой загрязнения экосистем. Чувствительность снежного покрова к смене индустриальной обстановки в регионе позволяет объективно оценивать состояние окружающей среды.

Различие районов по естественному поступлению макро- и микрокомпонентов из атмосферы вызывает необходимость оценки фонового поступления их на подстилающую поверхность. Определение фоновых показателей состава снежного покрова необходимо для индикации техногенного воздействия их на окружающую среду [3, 25].

Изучение химического состава снежного покрова особенно важно в условиях северных ландшафтов, где снежный покров сохраняется в течение 6–8 мес. Кроме того, высокоширотные территории отличаются от других климатических зон тем, что снег вносит значительный вклад в накопление химических веществ в ландшафтах и в формирование химического состава вод суши [21].

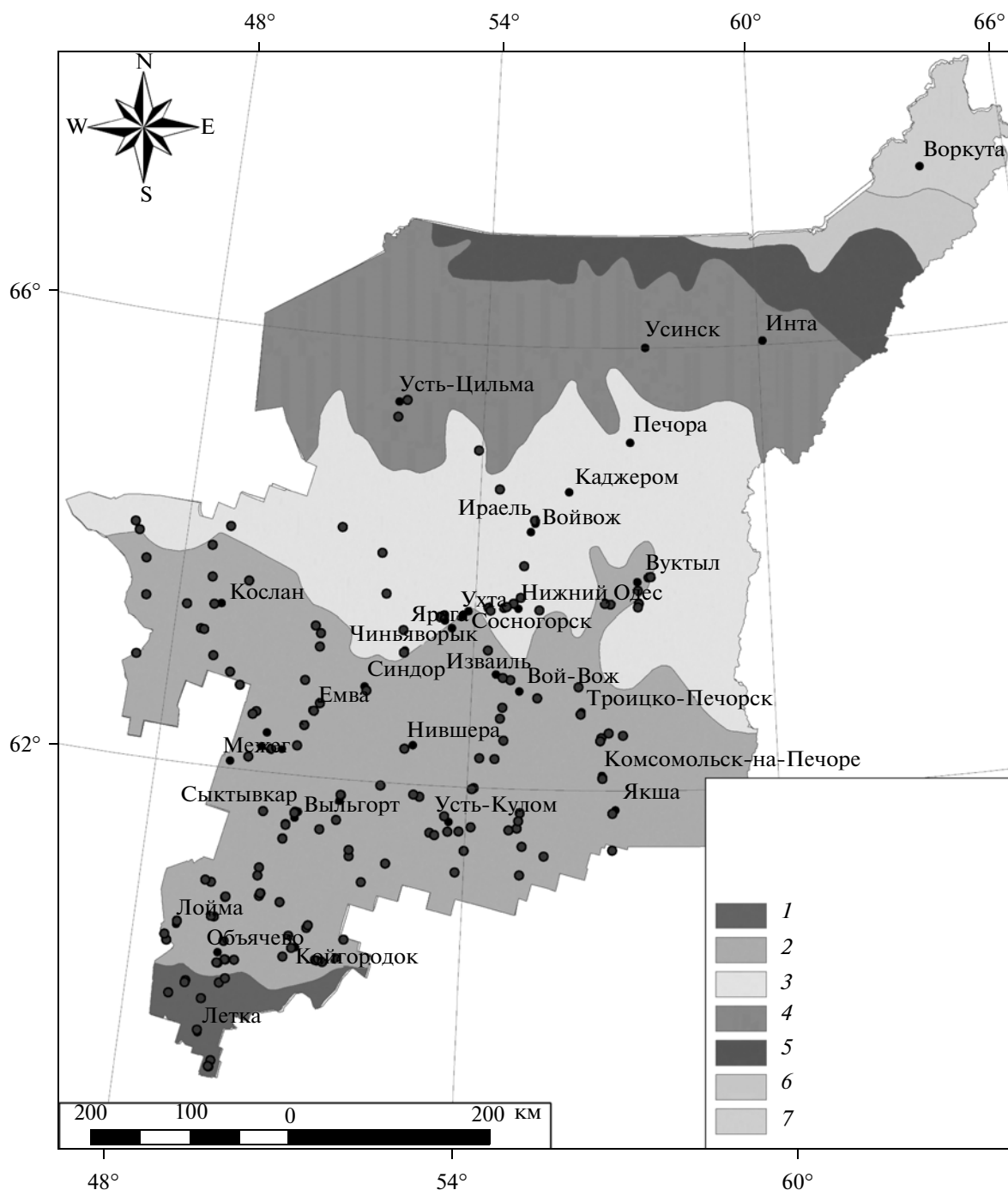
Фактический материал о химическом составе осадков на европейской и азиатской территории страны представлен в [2]. Выявлена пространственная связь между ареалами загрязнений и их источниками, показано формирование фона для всей территории страны и вклад дальнего переноса загрязняющих веществ (ЗВ) из районов с развитой промышленностью и сельским хозяйством. Обобщены данные по распределению основных ЗВ в непромышленных районах с целью определения их фонового содержания в природных средах. Однако подобных исследований на территории Республики Коми (РК) ранее не проводилось.

Цель настоящей работы – изучение химического состава снежного покрова и пространственного распределения макрокомпонентов на территории таежной зоны РК.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования был снежный покров фоновых территорий таежной зоны РК. Отбор образцов снежного покрова проведен по подзонам: южной, средней, северной. Схема отбора образцов снега представлена на рис. 1. Исследования были проведены в 2005–2007 гг. Отбор проб, хранение образцов снежного покрова, их химический анализ были выполнены в соответствии с руководством по контролю загрязнения атмосферы [14].

Отбор проб проводили во II–III декадах марта на открытых, визуально ровных площадках с предположительно равномерным поверхностным распределением ЗВ в снежном покрове, вдали от препят-



**Рис. 1.** Карта-схема расположения точек отбора проб снежного покрова на фоновых территориях таежной зоны РК. Подзоны: 1 – южная, 2 – средняя, 3 – северная, 4 – крайнесеверная тайга, 5 – южная, 6 – северная лесотундра, 7 – южная тундра. (Темные кружки – точки отбора проб.)

ствий, создающих ветровую тень, и лесных насаждений, а также от автомобильных и железных дорог для исключения возможного локального загрязнения. Пробы снега отбирали на участках, размером 10 × 10 м, на всю глубину залегания снежного покрова пластиковой трубой с внутренним диаметром

5.50 см и площадью сечения 23.7 см<sup>2</sup>. В работе была проведена оценка необходимого количества индивидуальных проб (керна), обеспечивающего представительность выборки для усредненной пробы. Статистически установлено, что с одного исследуемого участка достаточно отбирать одну смешанную

пробу (не менее 3 кернов). Общий объем пробы составлял не менее 2.5 дм<sup>3</sup>. Координатную привязку точек проводили с помощью GPS.

Количественный химический анализ образцов талой воды был выполнен по следующим показателям: удельная электропроводность, водородный показатель (рН),  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $P_{\text{мин}}$ . Химико-аналитические исследования проб талой воды были проведены в аккредитованной лаборатории “Экоаналит” Института биологии Коми НЦ УрО РАН. В область аккредитации лаборатории в качестве объектов исследования входят природные поверхностные и очищенные сточные воды, атмосферные осадки и снежный покров, почвы, растительные материалы. Качество проводимых измерений лаборатория подтверждает ежегодным участием в международных сравнительных испытаниях (Atmospheric deposition and soil solution Working Ring Test 2009, Italian National Research Council; The intercomparison test 0923, Norwegian Institute for Water Research).

Содержание исследуемых компонентов в талой воде определяли в единицах массовых концентраций – мг/дм<sup>3</sup>. Для более корректной интерпретации результатов эксперимента полученные результаты пересчитывали в соответствующие значения поступления веществ на поверхность по следующей формуле:

$$P[\text{г/м}^2] = \frac{C_m[\text{мг/дм}^3]V[\text{дм}^3]}{S[\text{см}^2]n} \times 10,$$

где  $P$  – масса определяемого компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова;  $C_m$  – массовая концентрация компонента в талой воде;  $V$  – объем талой воды всей пробы;  $S$  – площадь внутреннего поперечного сечения трубы для отбора проб снега;  $n$  – число кернов снежного покрова, отобранных в данной точке; 10 – коэффициент для согласования размерностей.

Для каждого участка была проведена статистическая обработка результатов (факторный и корреляционный анализы). Места отбора проб были нанесены на электронную карту РК с точной географической привязкой с использованием программы Arc View 3.2. На основе полученных данных по содержанию химических компонентов в снежном покрове были построены растровые изображения распределения ЗВ (grid-слои). Поверхности распределения моделировали путем интерполяции, применяя метод обратных взвешенных расстояний с использованием программного модуля Spatial Analyst (Arc View 3.2).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первичное представление о качестве природных вод можно получить по значениям интегральных параметров химического состава атмосферных осадков – рН и суммарному содержанию главных ионов  $\Sigma_{\text{и}}$ .

В пределах зоны избыточного и достаточного увлажнения, занимающей северную половину европейской территории России (ЕТР), значение  $\Sigma_{\text{и}}$  атмосферных осадков варьирует в диапазоне 5–25 мг/дм<sup>3</sup> [7]. Среднее значение  $\Sigma_{\text{и}}$  талой воды, по данным авторов, составило 2.8 мг/дм<sup>3</sup> и имеет тенденцию к уменьшению с увеличением широты (рис. 2). Максимальные значения  $\Sigma_{\text{и}}$  получены на восточной границе исследованного района, проходящей вдоль подножия Уральского хребта. В [3] отмечено, что повышенная минерализация атмосферных осадков в горной местности обусловлена естественным геохимическим накоплением в результате их конденсации. Между значениями  $\Sigma_{\text{и}}$  и рН в большинстве случаев наблюдается корреляционная взаимосвязь: с повышением суммарного содержания ионов значение рН в осадках возрастает ( $r_{\text{рН}-\Sigma_{\text{и}}} = 0.17 > r_{5\%} = 0.12$ ,  $n = 226$ ).

Средние концентрации основных компонентов в талой воде, отражающие химический состав снежного покрова фоновых территорий таежной зоны РК, а также средние значения поступления компонентов на подстилающую поверхность, выраженные в площадных единицах, представлены в табл. 1.

Важное значение для понимания химических процессов, происходящих при таянии снега, имеет кислотность талых вод. Кислые осадки, поступающие в почву, усиливают миграцию и выщелачивание различных элементов из почвенных горизонтов. Известно, что при среднем содержании диоксида углерода в атмосфере 375 ppт и температуре 20°C в воде атмосферных осадков устанавливается значение рН ~ 5.65. Если рН > 5.65, говорят о подщелачивании осадков, а при рН < 5.65 осадки считают закисленными.

Результаты исследований показали, что талая вода в таежной зоне характеризуется слабокислой реакцией. Среднее значение рН составило  $4.7 \pm 0.1$ . Наблюдается подкисление снежного покрова с севера на юг. Среднее за три года значение рН по северной тайге –  $4.8 \pm 0.1$ , по южной –  $4.6 \pm 0.1$ , что ниже значений, полученных в [6] для территории РК с 1958 по 1961 г. Значения рН талой воды в данный период варьировали в диапазоне 5.0–6.0.

По данным Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [11] наблюдается тенденция закисления снежного покрова на севере ЕТР (на 10–20%) в сравнении с центральной и южной частью европейского севера. За последние 10 лет наибольшая частота проявления закисления снежного покрова (рН < 5.6) отме-

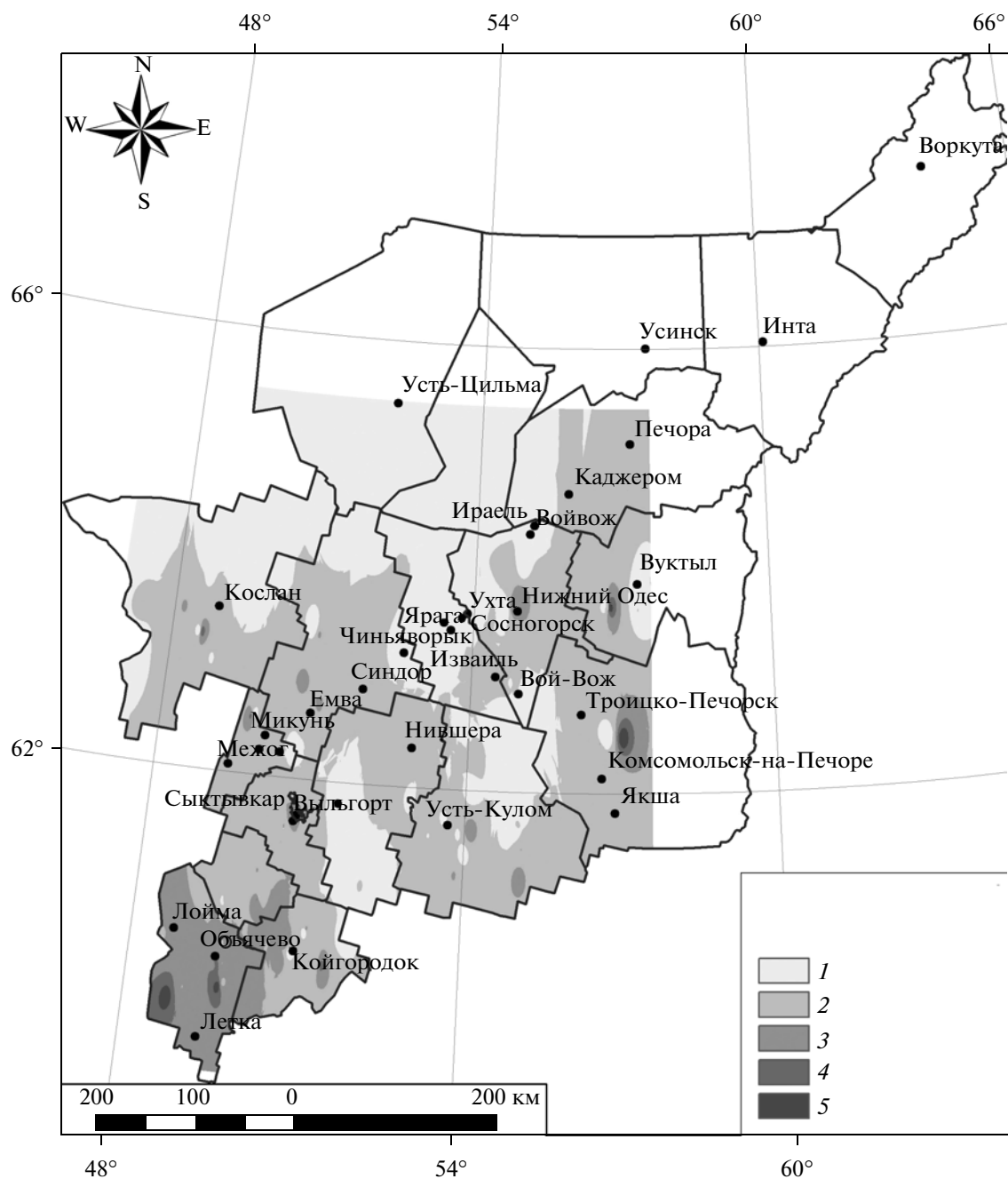


Рис. 2. Карта-схема распределения средних значений суммы массовых концентраций ионов в талой воде фоновых территорий таежной зоны РК в 2005–2007 гг. 1 – 0.81–1.84, 2 – 1.85–2.88, 3 – 2.89–3.92, 4 – 3.93–4.96, 5 – 4.97–6.00 мг/дм<sup>3</sup>.

чалась на Кольском п-ове, в регионе Урала, на севере и северо-востоке Западной Сибири. Тенденция к закислению проявляется также на Сахалине, в районе Чукотки, в Прибайкалье, в Карелии [9, 11, 15].

Характер распределения значений pH талой воды по группам кислотности показал, что ~76% значений находится в диапазоне 4.5–5.0. (табл. 2). Наибольшему подкислению подвержена территория южной тайги, где не обнаружено значений pH  $\geq$  5.0.

Для средней и северной тайги характерен разброс значений pH, однако преобладают значения 4.5–5.0 (73.5–92.6%). На территории северной тайги практически отсутствует тенденция как к сильному подкислению, так и к техногенному подщелачиванию снежного покрова.

Средние концентрации сульфат- и нитрат-анионов в атмосферных осадках в зимние периоды 2005–2007 гг. были использованы для расчета

**Таблица 1.** Поступление химических соединений на фоновые территории таежной зоны за 2005–2007 гг. ( $n = 226$ ,  $P = 0.95$ )

Показатель	Единицы измерения	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга
pH	—	$4.6 \pm 0.1$	$4.7 \pm 0.1$	$4.8 \pm 0.1$
ЕС*	$\mu\text{S}/\text{см}$	$10.02 \pm 0.47$	$9.85 \pm 0.13$	$9.41 \pm 0.32$
Cl <sup>-</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.14 \pm 0.009$	$0.16 \pm 0.009$	$0.20 \pm 0.01$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.016 \pm 0.001$	$0.021 \pm 0.0003$	$0.031 \pm 0.001$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.86 \pm 0.22$	$1.00 \pm 0.25$	$1.26 \pm 0.32$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.11 \pm 0.01$	$0.13 \pm 0.002$	$0.16 \pm 0.01$
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.039 \pm 0.009$	$0.063 \pm 0.13$	$0.077 \pm 0.018$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.0043 \pm 0.0002$	$0.0080 \pm 0.0001$	$0.0096 \pm 0.0003$
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.34 \pm 0.03$	$0.27 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.044 \pm 0.002$	$0.036 \pm 0.001$	$0.026 \pm 0.001$
N общий	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.400 \pm 0.016$	$0.360 \pm 0.010$	$0.250 \pm 0.009$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.049 \pm 0.002$	$0.046 \pm 0.001$	$0.033 \pm 0.001$
P общий	$\text{мкг}/\text{дм}^3$	$2.90 \pm 0.33$	$5.30 \pm 0.15$	$7.40 \pm 0.57$
	$\text{мг}/\text{м}^2$	$0.26 \pm 0.03$	$0.47 \pm 0.01$	$0.65 \pm 0.05$
Na <sup>+</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.170 \pm 0.005$	$0.130 \pm 0.010$	$0.180 \pm 0.003$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.0220 \pm 0.0002$	$0.017 \pm 0.001$	$0.024 \pm 0.002$
K <sup>+</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.045 \pm 0.006$	$0.075 \pm 0.005$	$0.130 \pm 0.012$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.0064 \pm 0.0008$	$0.0097 \pm 0.0003$	$0.0170 \pm 0.0016$
Ca <sup>2+</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.120 \pm 0.010$	$0.160 \pm 0.009$	$0.210 \pm 0.017$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.0160 \pm 0.0014$	$0.0210 \pm 0.0010$	$0.039 \pm 0.003$
Mg <sup>2+</sup>	$\text{мг}/\text{дм}^3$	$0.0210 \pm 0.0017$	$0.0210 \pm 0.0009$	$0.033 \pm 0.004$
	$\text{г}/\text{м}^2$	$0.0027 \pm 0.0002$	$0.0026 \pm 0.0001$	$0.0045 \pm 0.0003$

\*— удельная электропроводность.

$pA_i = -(\log [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ , что по своему физическому смыслу — pH осадков при условии, что в них не происходит нейтрализации серной и азотной кислот щелочными компонентами. Эту величину наряду с pH используют при обсуждении кислотно-основных свойств атмосферных осадков [22]. Сопоставление значений  $pA_i$  и pH свидетельствует о незначительной степени нейтрализации серной и азотной кислот (табл. 3). Повышение кислотности

**Таблица 2.** Распределение значений pH в снежном покрове фоновых территорий, % ( $n = 226$ )

Подзона тайги	Диапазон значений pH			
	4.0–4.5	4.5–5.0	5.0–5.5	5.5–6.0
Южная	28.6	71.4	0.0	0.0
Средняя	19.5	73.5	5.4	1.6
Северная	0.0	92.6	7.4	0.0
Всего	17.7	75.7	5.3	1.3

талых вод исследуемых территорий обусловлено, главным образом, диссоциацией серной кислоты в талой воде, о чем свидетельствуют высокие значения соотношения молярных концентраций эквивалентов ( $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-] \geq 1.4$ ). Преобладание содержания сульфатов над нитратами может быть объяснено более эффективным вымыванием из атмосферы диоксида серы, чем оксидов азота [23]. В [26] также отмечено преобладание сульфат-ионов над нитратами в снежном покрове в тундровой зоне РК. По величине значений  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$  были выделены зоны наибольшего техногенного воздействия — территории с развитой промышленностью (Вуктыльский, Ухтинский и Сосногорский районы) (рис. 3).

Эффективность нейтрализации кислотности снежного покрова оценивали через отношение суммы концентраций анионов ( $A = [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$ ) в талой воде к сумме концентраций катио-

Таблица 3. Соотношения молярных концентраций эквивалента главных ионов в жидкой фазе талой воды

Показатель	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга
pH	4.6	4.7	4.8
$pA_i$	4.4	4.5	4.6
$[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$	0.72	1.17	2.28
$\frac{[\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]}{[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]}$	0.42	0.49	0.83
$\frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{[\text{SO}_4^{2-}]}$	0.46	0.46	0.71
$\frac{[\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+]}{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{K}^+]}$	1.21	0.73	0.61
$[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$	2.08	1.24	1.22
$[\text{Cl}^-]/[\text{Na}^+]$	0.48	0.81	0.82

нов ( $K = [\text{NH}_4^+ + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$ ) [7]. Такой подход вполне оправдан, поскольку наличие в талой воде катионов во многом обусловлено растворением соединений, поступающих в атмосферу в результате ветровой эрозии почв, горных пород (карбонатов, фосфатов, силикатов). Процесс гидролиза карбонат-, фосфат- и силикат-анионов в водной среде сопровождается образованием гидроксид-ионов, количество которых эквивалентно концентрации катионов.

Из полученных данных (табл. 3) следует, что талая вода таежной зоны характеризуется значениями  $K/A < 1$  при увеличении данного отношения с юга на север от 0.42 до 0.83 (среднее значение равно 0.58). Таким образом, кислотно-основные свойства снежного покрова таежной зоны определяются дефицитом нейтрализующих соединений и преобладанием в талой воде ионов водорода, что соответствует общей ситуации на территории России, где доля катионов в атмосферных осадках, как правило, близка к 30% суммарного содержания ионов, включая гидроксид-ионы и ионы водорода [12].

Основные нейтрализующие компоненты – соединения кальция и магния, что следует из близости отношений  $K/A$  и  $([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])/[\text{SO}_4^{2-}]$ . Увеличение значения данного соотношения в северной тайге свидетельствует о подщелачивании снега, по сравнению с южной тайгой. Существует взаимосвязь между величиной кислотности талых вод и содержанием в них ионов кальция и магния:

$r_{\text{pH}-\text{Ca}^{2+}} = 0.22$ ,  $r_{\text{pH}-\text{Mg}^{2+}} = 0.29$ . Относительно высокое значение коэффициента корреляции между концентрациями ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.56$ ) указывает на единый эрозионный источник поступления этих компонентов в атмосферу.

По картосхеме распределения значений водородного показателя выявлены участки с достаточно эффективной нейтрализацией кислотных компонентов щелочными составляющими талых вод. Наиболее высокие значения водородного показателя характерны для территорий, на которых расположены такие промышленные центры как г. Сыктывкар, Ухтинско-Сосногорская агломерация, г. Вуктыл (рис. 4).

Элементы магний и натрий имеют, как правило, морское происхождение, калий – терригенное. Значение соотношения  $([\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+])/([\text{Ca}^{2+}] + [\text{K}^+])$  отражает преобладание морской ( $>1$ ) или терригенной ( $<1$ ) составляющих. В южной тайге ионы натрия и магния преобладают над ионами калия и кальция, что обусловлено техногенными факторами, а не влиянием морского аэрозоля. Данное предположение подтверждается отклонением соотношения  $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$  относительно значения для морской соли, равного 0.86. В южной подзоне тайги это соотношение составляет 2.08, северной – 1.22. С юга на север таежной зоны наблюдается увеличение концентрации в снеге хлорид-ионов и катионов натрия. Этот факт указывает на усиление вли-



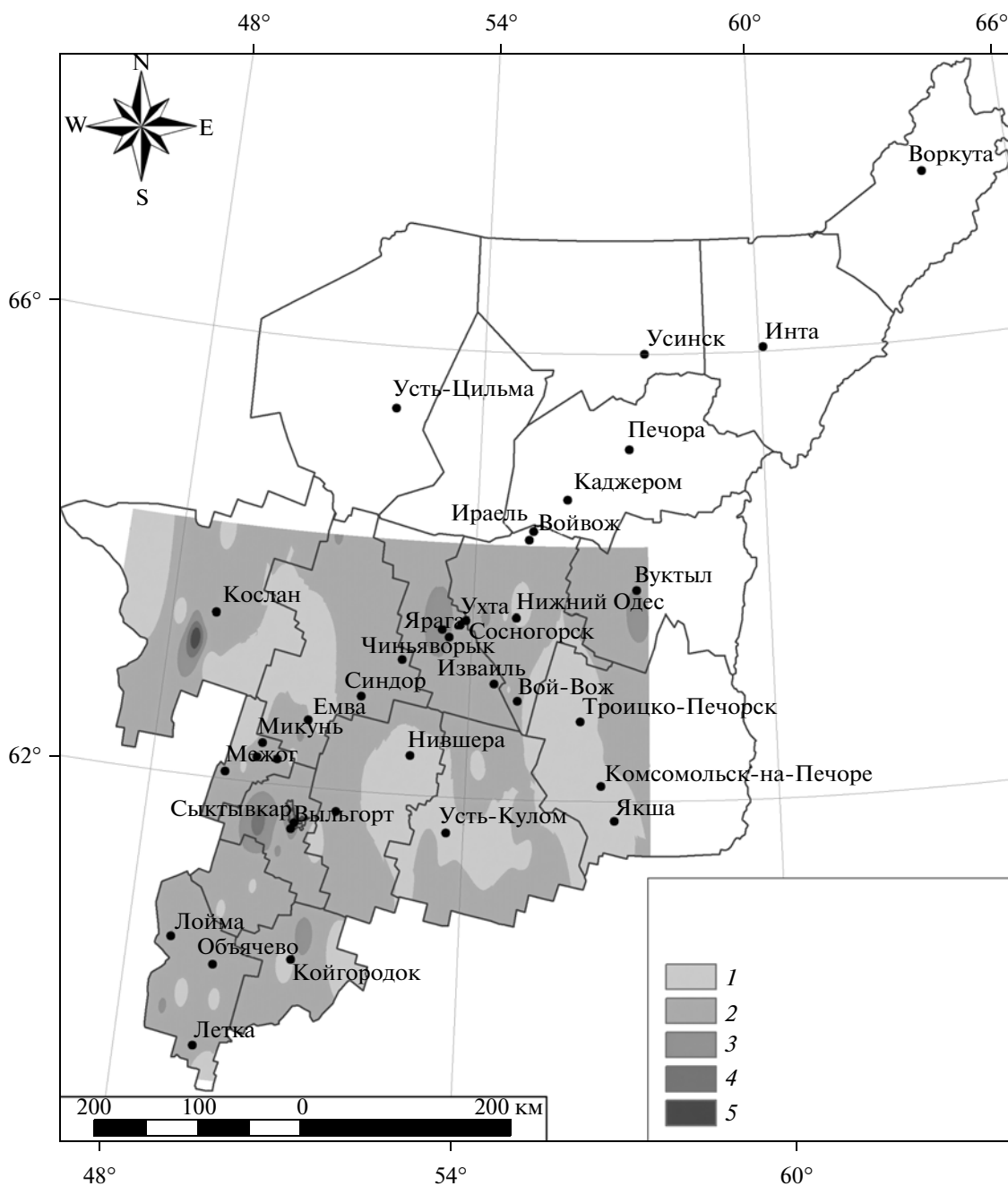


Рис. 4. Карта-схема распределения средних значений pH в талой воде фоновых территорий таежной зоны РК. 1 – 4.3–4.6, 2 – 4.7–4.9, 3 – 5.0–5.2, 4 – 5.3–5.5, 5 – 5.6–5.8.

с юга на север возрастает. Другим аргументом может быть низкое значение коэффициента корреляции между содержанием  $\text{Cl}^-$  и содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r_{\text{Cl}^-\text{SO}_4^{2-}} = 0.14$ ). Поступление последних обусловлено эмиссией от сжигания топлива на ТЭЦ в зимний период.

Соотношение молярных концентраций эквивалента  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Cl}^-]$  используют для выяснения происхождения состава атмосферных осадков, а также

для оценки загрязненности атмосферы промышленными эмиссиями [17]. В среднем для северо-западных территорий России содержание в атмосферных осадках  $\text{SO}_4^{2-}$  в два раза больше, чем  $\text{Cl}^-$ . Большая часть  $\text{SO}_4^{2-}$  имеет не морское происхождение. Для фоновой территории Байкальского биосферного заповедника значение  $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{Cl}^-]$  не превышает 3 [15].



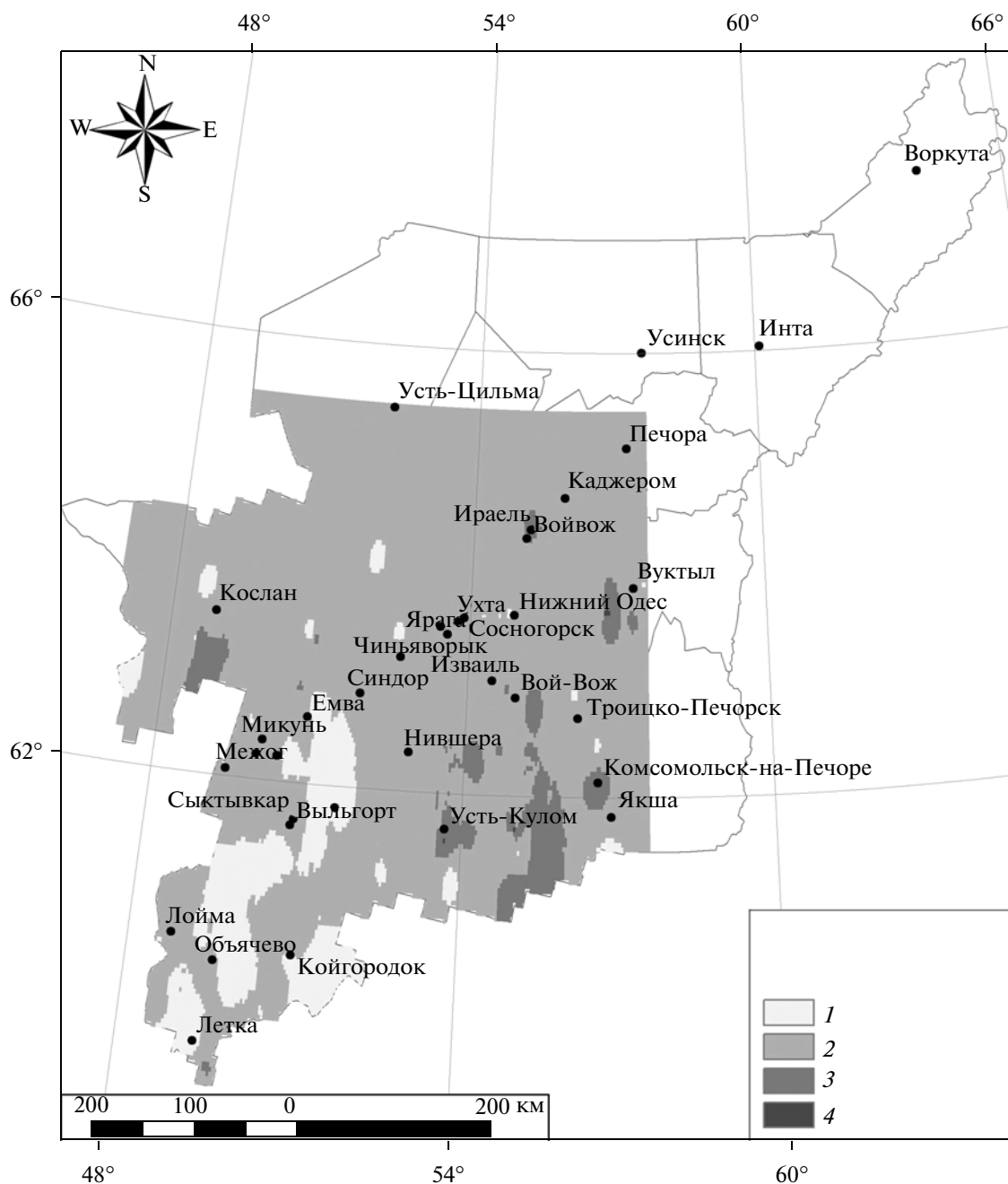


Рис. 5. Карта-схема распределения значений отношения молярных концентраций  $[Cl^-]/[Na^+]$  в снежном покрове таежной зоны РК. 1 – 0.021–0.580, 2 – 0.581–1.166, 3 – 1.167–1.750, 4 – 1.751–1.985.

Полученные значения  $[SO_4^{2-}]/[Cl^-]$  в талой воде уменьшаются с 4.9 в южной подзоне тайги до 3.7 в северной, доля морской составляющей в общем содержании  $SO_4^{2-}$  в северотаежной подзоне незначительно повышается (табл. 4). Общее поступление  $SO_4^{2-}$  составляет в среднем 0.40 г/(м<sup>2</sup> год), что указывает на незначительное техногенное воздействие на фоновые территории таежной зоны РК по сравне-

нию с северо-западной частью России, где выпадения  $SO_4^{2-}$  варьируют в диапазоне от 5 до 10 г/(м<sup>2</sup> год) [5]. Сравнение исследований по различным территориям северного полушария также подтверждает низкое поступление  $SO_4^{2-}$  в таежной зоне региона по сравнению с другими районами (табл. 5). Таежную зону РК по поступлению веществ с зимними атмосферными осадками можно приравнять к арктическим регионам.

На основе данных по химическому составу снежного покрова рассчитаны годовые потоки соединений S и N (N, S, H<sup>+</sup>), поступающие на подстилающую поверхность таежной зоны (табл. 6). Среднегодовое количество атмосферных выпадений в виде N, S, H<sup>+</sup>, влияющих на наземные и водные экосистемы, не превышает количества выпадений этих соединений для северных и центральных районов ЕТР [8].

На основании полученных данных были построены геохимические ряды ионов в составе снежного покрова, в которых использованы значения превышения молярной концентрации эквивалента данного иона относительно минимальной концентрации (табл. 4). По классификации О.А. Алекина [1] талые воды в большинстве случаев относятся к сульфатному классу, группе кальция, четвертому типу ([HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] = 0), (воды – кислые с преобладанием в балансе катионов ионов водород) (табл. 7). По данным [11] на всей территории России в 50% случаев атмосферные осадки относятся к сульфатно-гидрокарбонатному типу. Меньший вклад вносят NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup>. Таким образом, полученные геохимические ряды ионов подтверждают имеющиеся данные о химическом составе атмосферных осадков на ЕТР.

Результаты факторного анализа дополняют и во многом объясняют полученные выше взаимосвязи между минеральными компонентами снежного покрова. Более четкая картина распределения ионов по группам была выявлена в результате анализа суммарной матрицы химического состава снежного покрова за три года исследований (табл. 8). По результатам факторного анализа были выделены три основные группы ионов (60%). К первой группе отнесены ионы Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, поступающие в снежный покров в виде хорошо растворимых соединений. Ионы Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> имеют почвенно-эрозионное происхождение. Ионы Na<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup> проявляют высокую степень сродства и мигрируют в геохимическом цикле в виде аэрозолей морского происхождения [10].

Вторая группа включает N-содержащие ионы и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, которые образуются в результате взаимодействия атмосферной влаги с оксидами N, S и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, обуславливающих подкисление осадков.

Ионы третьей группы (Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, P<sub>мин</sub> (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)) накапливаются в снежном покрове в результате растворения в кислой среде фосфатов. Поступление этих компонентов в снежный покров обусловлено, главным образом, как естественными процессами выветривания горных пород, содержащих фосфаты магния и кальция, так и техногенными факторами. Максимальные значения SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> соответствует пятому фактору [13].

**Таблица 4.** Соотношение молярных концентраций эквивалента [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/[Cl<sup>-</sup>] и доля морской составляющей в общем содержании SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Показатель	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/[Cl <sup>-</sup> ]	4.85	4.62	3.74
Доля морской составляющей SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , %	2.9	3.0	3.8

**Таблица 5.** Средние значения поступления SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (P(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)) на различные территории северного полушария

Территория	P(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), г м <sup>-2</sup> год <sup>-1</sup>	Источник
Канада (северные районы)	2.55	[20]
Якутия	0.80	[10]
Карелия	1.17	[9]
п-ов Ямал	0.39	[24]
п-ов Таймыр	0.30	[24]
Земля Франца Иосифа	0.42	[24]
Северная Земля	0.27	[24]
Новосибирские о-ва	0.12	[24]
Северо-запад ЕТР	2.43	[24]
ЕТР	1.50	[11]
Северо-запад ЕТР	2.70	[12]
РК (таежная зона)	0.40	Настоящая работа

**Таблица 6.** Выпадение S, N и H<sup>+</sup> на территорию таежной зоны, кг км<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>

Распределение		S	N	H <sup>+</sup>
Южная тайга	Минимальное	12	40	0.012
	Максимальное	150	360	0.041
	Среднее	107	150	0.025
Средняя тайга	Минимальное	7	20	0.0014
	Максимальное	370	520	0.052
	Среднее	133	139	0.020
Северная тайга	Минимальное	8	20	0.0056
	Максимальное	200	420	0.031
	Среднее	157	140	0.016

**Таблица 7.** Геохимические ряды главных ионов

Подзона тайги	Ряды главных ионов
Южная	$\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ $7 > 5 > 1$ $\text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+$ $28 > 5 > 4 > 2 > 1$
Средняя	$\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ $5 > 4 > 1$ $\text{H}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}$ $21 > 5 > 4 > 3 > 1$
Северная	$\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ $4 > 2 > 1$ $\text{H}^+, \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}$ $5 > 3 > 2 > 1$

Накопление  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NH}_4^+$  в снежном покрове обусловлено выделением их в процессе жизнедеятельности растений [16], а также в результате техногенной эмиссии при сжигании различных видов топлива. Пятый фактор отражает поступление

$\text{NO}_3^-$  во взаимосвязи с  $\text{SO}_4^{2-}$  в результате техногенной эмиссии. Таким образом, формирование химического состава снежного покрова происходит за счет как природных, так и техногенных факторов.

Для общей характеристики химического состава снежного покрова фоновых территорий таежной зоны рассчитаны индексы суммарной нагрузки на территорию  $R$ , что позволило дополнительно выявить зоны повышенного поступления веществ (рис. 6). Расчет значений  $R$  проводили по формуле

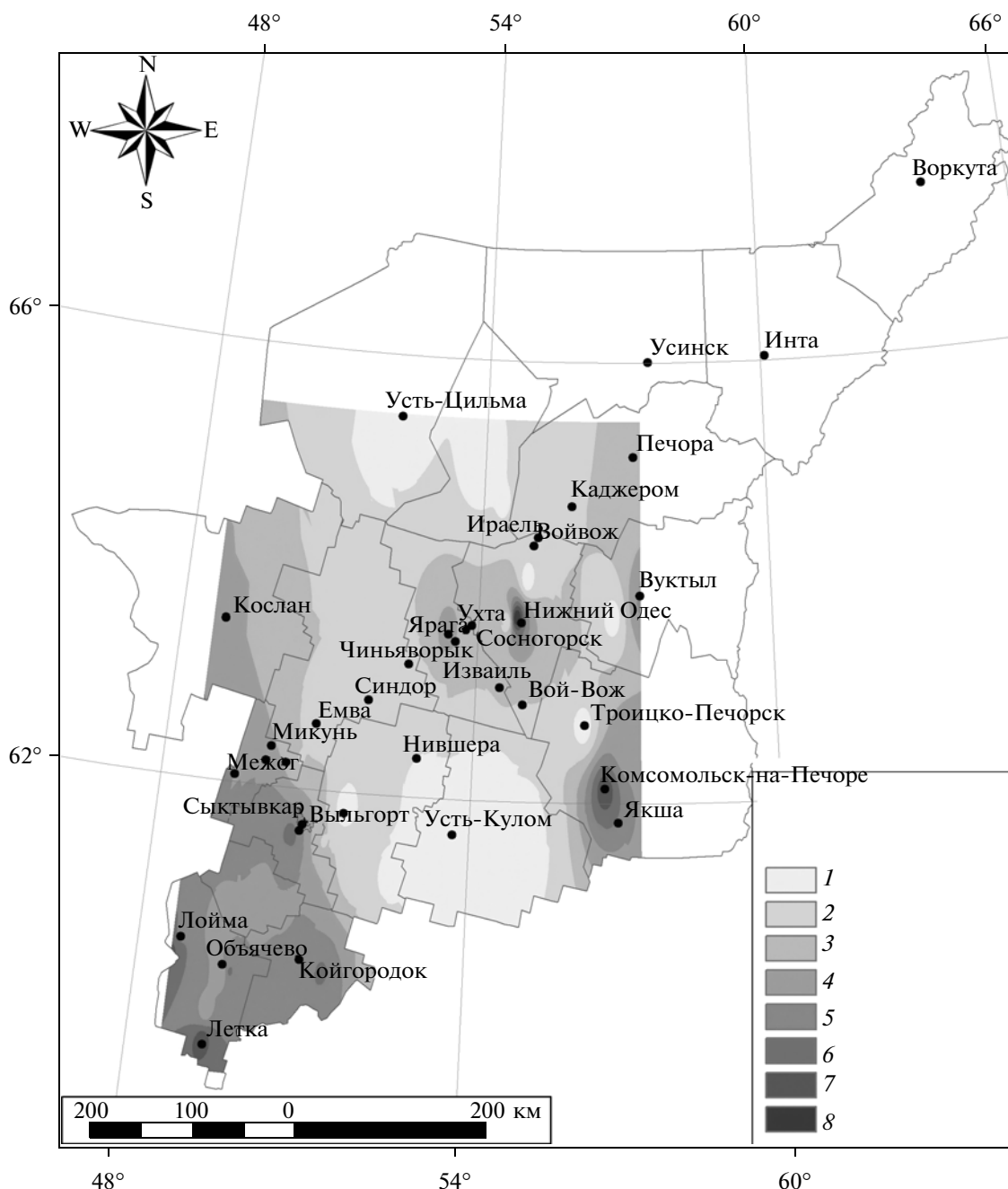
$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

где  $n$  – число определяемых компонентов,  $P_i$  – содержание  $i$ -го компонента в снежном покрове, г/м<sup>2</sup>.

Расчеты показали, что наибольшее поступление веществ отмечено для южных районов РК: Прилузского, Сысольского, Койгородского, Сыктывдинского, а также территории вблизи промышленных населенных пунктов – поселков Ярега, Нижний Одес, городов Ухта, Сосногорск. Повышение значений  $R$  отмечено также для восточных территорий: Троицко-Печорского и Вуктыльского районов. Более благоприятная ситуация – для северных районов: Усть-Цилемского, Ижемского, Усть-Куломского. Минимальное значение  $R$  (0.01) соответствует Усть-Куломскому району.

**Таблица 8.** Факторные веса компонентов снежного покрова  $r^2$  (числитель – суммарный вес каждого фактора, знаменатель – его значение, %)

Компонент	Номер фактора, $F$										$\sum_{f=1}^F r(X)_f^2$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$\text{Cl}^-$	0.653	0.000	0.019	0.038	0.057	0.077	0.033	0.007	0.001	0.116	1.000
$\text{SO}_4^{2-}$	0.092	0.232	0.121	0.012	0.313	0.200	0.009	0.013	0.001	0.007	1.000
$\text{N}-\text{NH}_4^+$	0.213	0.467	0.074	0.004	0.010	0.023	0.001	0.200	0.003	0.004	1.000
$\text{N}-\text{NO}_2^-$	0.309	0.184	0.014	0.115	0.021	0.162	0.115	0.078	0.000	0.001	1.000
$\text{N}-\text{NO}_3^-$	0.150	0.179	0.070	0.012	0.333	0.218	0.004	0.031	0.002	0.001	1.000
$R_{\text{мин}}$	0.106	0.041	0.244	0.467	0.037	0.002	0.060	0.042	0.001	0.000	1.000
$\text{Na}^+$	0.520	0.120	0.056	0.088	0.025	0.043	0.039	0.003	0.000	0.106	1.000
$\text{Mg}^{2+}$	0.454	0.061	0.239	0.016	0.002	0.001	0.034	0.017	0.175	0.000	1.000
$\text{K}^+$	0.560	0.000	0.012	0.068	0.008	0.063	0.178	0.027	0.084	0.000	1.000
$\text{Ca}^{2+}$	0.065	0.131	0.503	0.129	0.031	0.014	0.044	0.004	0.079	0.000	1.000
$\sum_{n=1}^N r(X)_n^2$	$\frac{3.123}{31.23}$	$\frac{1.415}{14.15}$	$\frac{1.353}{13.53}$	$\frac{0.950}{9.50}$	$\frac{0.836}{8.36}$	$\frac{0.803}{8.03}$	$\frac{0.516}{5.16}$	$\frac{0.423}{4.23}$	$\frac{0.346}{3.46}$	$\frac{0.236}{2.36}$	$\frac{10}{100}$



**Рис. 6.** Карта-схема распределения значений индекса суммарной нагрузки  $R$ , рассчитанных для химического состава талой воды фоновых территорий таежной зоны РК. 1 – 0.009–0.020, 2 – 0.021–0.031, 3 – 0.032–0.043, 4 – 0.044–0.054, 5 – 0.055–0.065, 6 – 0.066–0.076, 7 – 0.077–0.088, 8 – 0.089–0.099.

## ВЫВОДЫ

Снежный покров таежной зоны РК характеризуется низкой минерализацией и кислой реакцией среды. Кислотность талой воды обусловлена преобладанием сильных минеральных кислот и возрастающим с юга на север дефицитом нейтрализующих соединений. Наблюдается статистически достоверная широтная дифференциация распределения элементов в снежном покрове таежной зоны РК. В ре-

зультате факторного анализа массивов данных выявлены источники поступления веществ в снежный покров как природного, так и техногенного происхождения. Создана картографическая основа пространственного распределения химических компонентов в снежном покрове, которая позволила выявить зоны накопления, обусловленные влиянием естественных факторов среды и источниками техногенного воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометиздат, 1970. 444 с.
2. *Глазовский Н.Ф., Учватов В.П.* Химический состав атмосферной пыли некоторых районов ЕТС. Пушкино: Науч. центр биологических исследований АН СССР, 1981. 31 с.
3. *Глазовский Н.Ф., Злобина А.И., Учватов В.П.* Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеокского бассейна // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 67–86.
4. *Горюнова Н.В., Шевченко В.П., Новигатский А.Н.* Геохимия снежного покрова в Арктике // Матер. междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных регионов”. Нарьян-Мар, 2007. Т. 1. С. 204–206.
5. *Джамалов Р.Г., Злобина В.Л.* Влияние состава атмосферных осадков на качество грунтовых вод // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 6. С. 645–651.
6. *Дроздова В.М., Петренчук О.П., Селезнева Е.С., Свистов П.Ф.* Химический состав атмосферных осадков на Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1964. 209 с.
7. *Зверев В.П., Варванина О.Ю., Путилина В.С.* Закономерности изменения состава атмосферных осадков на территории России // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1997. № 5. С. 30–38.
8. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: М-во охраны окружающей среды РФ, 1992. 48 с.
9. *Лозовик П.А., Потапова И.Ю.* Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 1. С. 111–118.
10. *Макаров В.Н.* Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2007. 88 с.
11. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2005 г. М.: Росгидромет, 2006. 190 с.
12. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2006 г. М.: Росгидромет, 2007. 162 с.
13. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1975. 423 с.
14. Руководство по контролю загрязнения атмосферы / Под ред. Семенова А.Д. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 693 с.
15. *Санина Н.Б., СклярOVA О.А., Костин С.Б.* Геохимические исследования снежного покрова Байкальского биосферного заповедника (в связи с проблемой деградации пихтовых лесов северного склона хр. Хамар-Дабан) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2003. № 2. С. 120–129.
16. *Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П.* Сезонная динамика ионного состава атмосферных аэрозолей и осадков Новосибирской области // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 464–470.
17. *Чудаева В.А., Чудаев О.В., Юрченко С.Г.* Особенности химического состава атмосферных осадков на юге Дальнего Востока // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 60–71.
18. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др.* Осадочный материал в снежном покрове дрейфующих льдов в проливе Фрама // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Науч. мир, 2001. 644 с.
19. *Юдович Я.Э., Кэтрис М.П.* Токсичные элементы – примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 654 с.
20. Acid deposition long-term trends. Washington: National Acad. Press, 1986. 439 p.
21. *Lisitzn A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the World Ocean. Recent and Past. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 563 p.
22. *Miller J.D., Anderson H.A., Harriman R.* The consequences of liming a highly acidified catchment in central Scotland // Water Air Soil Pollution. 1995. V. 85. № 2. P. 1015–1020.
23. *Moody J.L., Samson P.J.* The influence of atmospheric transport on precipitation chemistry at two sites in the Midwestern United States // Atmospheric Environment. 1989. V. 23. P. 2117–2132.
24. *Pacyna J.M.* Chemical tracers of the origins of arctic air pollution // Pollution of the Arctic Atmosphere. Berlin; Heidelberg: Elsevier, 1991. P. 97–122.
25. *Ryaboshapko A., Gallardo L., Kjellstro M.E. et al.* Balances of oxidized sulfur and nitrogen over the former Soviet Union Territory // Atmospheric Environment. 1998. V. 32. P. 647–658.
26. *Walker T.R., Young S.D., Crittenden P.D., Zhang H.* Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern European Russia // Environ. Pollution. 2003. V. 121. P. 11–21.