

М.Ю. Семенов, О.Г. Нецветаева, Н.А. Кобелева, Т.В. Ходжер

Современная и допустимая кислотные нагрузки на территорию азиатской части России

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

Дана оценка современной атмосферной кислотной нагрузки и ее допустимых пределов, обусловленных чувствительностью наземных экосистем, на территорию азиатской части России. В качестве меры устойчивости использована критическая нагрузка по кислотности. Произведена коррекция величин выпадений посредством вычета из них морской составляющей. Составлены карты пространственного распределения величин кислотных и основных компонентов атмосферных выпадений, современной кислотной нагрузки и критических нагрузок подкисляющих соединений на экосистемы. Показано, что величины критических нагрузок на большей части исследованной территории в несколько раз превышают современную кислотную нагрузку и варьируют от 0 до 7 экв · га⁻¹ · год⁻¹.

Проблема кислотных выпадений и концепция критических нагрузок

Проблема кислотных дождей является одной из важнейших в современной науке о Земле, поскольку, несмотря на принимаемые меры по сокращению выбросов в атмосферу кислотообразующих поллютантов, масштабы подкисления биосферы растут.

Известно, что подкисление нельзя оценивать только исходя из содержания водородных ионов. Само по себе увеличение протонной нагрузки на систему в целом или концентрации водородных ионов в том или ином ее компоненте еще не означает проявления связанных с подкислением неблагоприятных эффектов. Имея дело со сложными природными объектами, способными активно противодействовать изменению среды, следует пользоваться количественными характеристиками «способности к нейтрализации», выражаемыми в единицах количества вещества на единицу времени воздействия. В качестве количественной меры устойчивости экосистем к подкислению в данной статье была использована критическая нагрузка по кислотности, т.е. максимальное количество кислотных выпадений, не вызывающих в течение длительного времени химических изменений, сопровождающихся вредным воздействием на экосистему [1].

Материалы и методы

Критические нагрузки

Применительно к нашему случаю под величиной критической нагрузки по кислотности (CL(As)) понимается количество кислоты (кислотных выпадений), которое нужно прибавить в систему, для того чтобы достичь равного единице критического отношения суммы концентраций физиологически активных катионов (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺) к не связанному органическими кислотами алюминию (Al³⁺, AlOH²⁺, Al(OH)₂⁺) в почвенном растворе. При более низких значениях, согласно многочисленным свидетельствам,

уменьшается поглощение растениями основных элементов минерального питания и соответственно их устойчивость к другим факторам среды [2]. Величины критических нагрузок рассчитывались при помощи биогеохимической модели PROFILE [3]. В качестве входных использовались параметры биологического круговорота, физического и химического состояния почв и атмосферы.

Атмосферные выпадения

Большая часть данных по качественному и количественному составу атмосферных выпадений взята из [4–9]. Данные по Байкальскому региону получены сотрудниками лаборатории гидрохимии и химии атмосферы ЛИИ СО РАН.

Известно, что снег является наиболее информативным, интегральным показателем поступления вещества в экосистему из атмосферы. В отличие от жидких осадков он не только более эффективно, чем дожди, выводит из атмосферы твердые примеси, но и аккумулирует значительные количества пыли в результате ее гравитационного осаждения. Пыль, аккумулированная в снеге, на 5–20% растворяется при оттепелях и снеготаянии [10] и обогащает снеговые воды щелочными и щелочноземельными элементами. Химический состав снега также частично отражает взаимодействие между осадками (снегом) и кронами деревьев. Учитывая все вышесказанное, поступление вещества в экосистемы из атмосферы рассчитывали на основе данных о химическом составе снеговых вод и некоторых климатических данных.

Известно также повсеместное влияние Мирового океана на химический состав атмосферных осадков. Анализы химического состава осадков, выпадающих в нивальных высокогорных областях, на ледниках Антарктиды, у верхней границы тропосферы, т.е. в местах, удаленных от водной поверхности, дали сходные результаты. Состав их – преимущественно хлоридно-натриево-магниевый, близкий к составу морской воды. Соли морского происхождения, так называемые «циклические» соли, – нейтральны, т.е. катионы щелочных и щелочноземельных металлов в них скомпенсированы анионами сильных кислот, а привносятся

мая с ними кислотность равна нулю [11]. Для того чтобы исключить морские соли из баланса кислотности, принято, что весь натрий атмосферных выпадений имеет морское происхождение. В соответствии с этим положением была сделана попытка из выпадений каждого элемента вычест его «морскую» долю, рассчитанную по отношению соответствующего элемента к натрию в морской воде по следующей формуле:

$$X_{\text{dep}}^* = X_{\text{dep}} - Na_{\text{dep}} (S_{\text{sw}}/Na_{\text{sw}}), \quad (1)$$

где X – это S, Cl, Ca, Mg, K; X_{dep} , Na_{dep} – выпадения соответствующих элементов (компонентов); X_{dep}^* – скорректированные по натрию выпадения элементов; $X_{\text{sw}}/Na_{\text{sw}}$ – отношение содержания соответствующего элемента к содержанию натрия в морской воде (экв/экв): для S = 0,12, Ca = 0,044, Mg = 0,227, K = 0,021, Cl = 1,164.

Выпадения аммония и нитратов не имеют морского происхождения и коррекции не подвергаются. Такая коррекция количеств выпадений правомочна лишь в районах, где единственным источником натрия в атмосфере является Мировой океан. В районах же, где помимо океанического натрия в атмосфере присутствуют также значительные количества антропогенного либо континентального натрия (соленые озера, развезаемые солончаки и т.д.), подобная коррекция приводит к недооценке поступления всех (за исключением азотных) компонентов атмосферных выпадений [11] и искажает картину реального баланса между кислотными и основными компонентами (ANC).

В таблице представлены сравнительные данные по соотношениям между кислотными и основными компонен-

тами атмосферных выпадений с учетом их реальных и скорректированных величин: BC – основные компоненты атмосферных выпадений ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$); Bc – физиологически активные катионы ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$); Ac – кислотные компоненты без учета нитратов; ANC – величина кислотонейтрализующей способности осадков = Bc – Ac без учета аммония и нитратов; ANC – общая величина кислотонейтрализующей способности.

В тех районах, где весь натрий имеет морское происхождение, значения кислотонейтрализующей способности остаются неизменными. Помимо оценки количеств выпадений, реально влияющих на кислотно-основную обстановку в наземных экосистемах, данная процедура позволяет идентифицировать районы с наземными источниками (естественными и антропогенными) натрия.

При расчете величин выпадений подкисляющих соединений кроме традиционно подкисляющих сульфатов, хлоридов и нитратов учитывались и выпадения аммония.

Хотя ион аммония и является катионом и в балансе кислотности осадков его количество учитывается как количество оснований, в настоящей статье аммоний рассматривается как потенциальный источник кислотности, так как, попадая в почву, он полностью нитрифицируется, продуцируя один протон водорода на каждый ион. Таким образом, величину современной кислотной нагрузки можно записать в виде

$$Ac(\text{pot})_{\text{вып}} = SO_{\text{хвып}}^* + NO_{\text{увып}} + NH_{4\text{вып}} - BC_{\text{вып}}^* + Cl_{\text{вып}}^*, \quad (2)$$

где $Ac(\text{pot})_{\text{вып}}$ – современная кислотная нагрузка; звездочкой обозначены «скорректированные» величины выпадений.

Сравнение реальных и скорректированных величин баланса между кислотными и основными компонентами атмосферных выпадений, экв·га⁻¹·год⁻¹

Район	Реальные величины				Скорректированные			
	BC-Na	Ac	ANC	ANC	Bc	Ac	ANC	ANC
<i>Без искажений</i>								
Якутск	0,14–0,03	0,09	0,05	0,04	0,10	0,05	0,05	0,04
Монды	0,24–0,02	0,78	–0,54	–0,56	0,21	0,75	–0,54	–0,56
Ильчир	0,50–0,02	0,20	0,30	0,24	0,47	0,17	0,30	0,24
Прибайкалье	0,47–0,03	0,24	0,23	0,15	0,43	0,20	0,23	0,15
Головная	1,08–0,09	0,62	0,46	0,28	0,92	0,36	0,46	0,28
<i>С искажениями</i>								
Мирный	0,36–0,31	0,30	0,06	–0,03	0,017	0,15	–0,13	–0,22
Нерюнгри	0,49–0,26	0,10	0,39	0,35	0,16	0,00	0,16	0,12
Ямал	0,98–0,84	0,73	0,25	0,21	0,03	0,00	0,03	–0,01
Приморье	1,31–0,55	0,49	0,82	0,62	0,60	0,25	0,35	0,15

Пространственное распределение компонентов атмосферных выпадений

Для оценки современной кислотной нагрузки нами было произведено картирование основных параметров, используемых при ее расчете: основных и кислотных компонентов атмосферных выпадений.

Основные компоненты

Полученная нами картина пространственного распределения величин атмосферных выпадений физиологически активных катионов (рис. 1) дает основание предполагать направленный атмосферный перенос золотых частиц из районов, подверженных ветровой эрозии, – сельскохозяйственных районов ЕТС, степной и лесостепной зон ЕТС и АТС и пустынь и полупустынь Средней Азии. Величины

суммарного поступления физиологически активных катионов варьируют от 0,05 до 1,30 экв·га⁻¹·год⁻¹. Максимальные величины выпадений отмечены в пределах южнотаежной и лесостепной зон Западной Сибири, минимальные – практически на всем протяжении тундровой зоны, за исключением территорий близ Северного Урала. На территории восточнее Среднесибирского плоскогорья низкие величины выпадений физиологически активных катионов «спускаются» к зоне южной тайги.

Особо следует отметить выгибание изолиний выпадений вдоль линии Транссибирской железнодорожной магистрали. По нашему мнению, это обстоятельство кроме явления так называемого «западного переноса» отчасти связано еще и с хозяйственной деятельностью человека, так как известно, что наибольшая плотность населения (а равно и промышленности) приурочена к зоне магистрали. Таким образом, на этой территории значительная роль в

распределении вещества может принадлежать также явлению локального переноса (помимо тропосферного).

Кислотные компоненты

Пространственные закономерности распределения выпадений кислотных компонентов атмосферных осадков во многом совпадают с закономерностями распределения выпадений физиологически активных катионов (рис. 2).

Основные отличия заключаются в локализации высоких величин выпадений и градиенте пространственного распре-

деления величин выпадений, тогда как в пользу эолового происхождения выпадений катионов говорят их четкая локализация и небольшая площадь распространения. В пространственном распределении кислотных компонентов наблюдаются отсутствие четкой привязки к определенным географическим объектам, некоторая «размытость» очертаний контуров высоких величин выпадений, их большая протяженность как в широтном, так и в меридиональном направлениях, которые мы, как и в случае с физиологически активными катионами, связываем со спецификой агрегатного состояния соединений, в данном случае – газового.

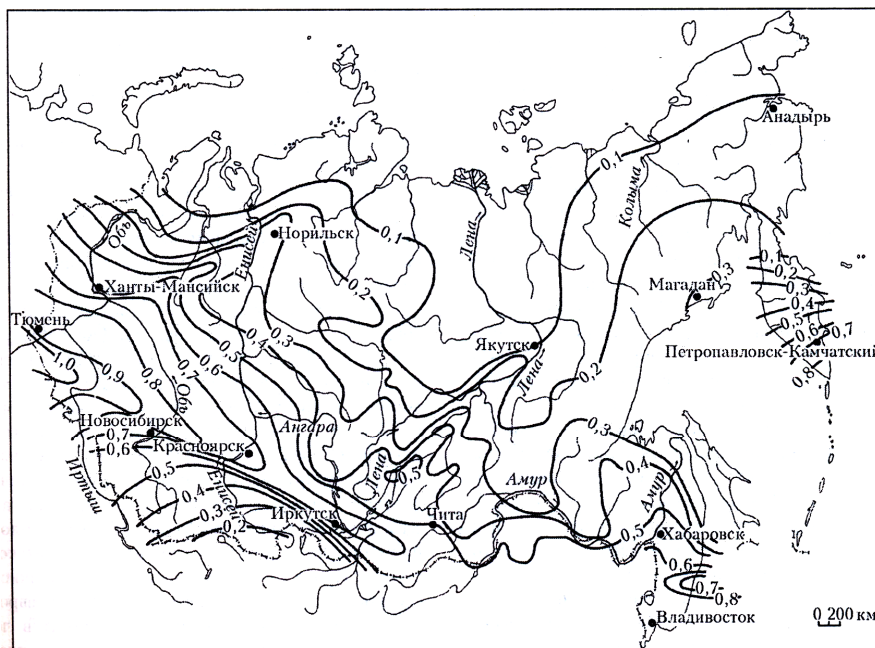


Рис. 1. Атмосферные выпадения основных компонентов (Bs) на территории азиатской части России, кэква⁻¹·год⁻¹

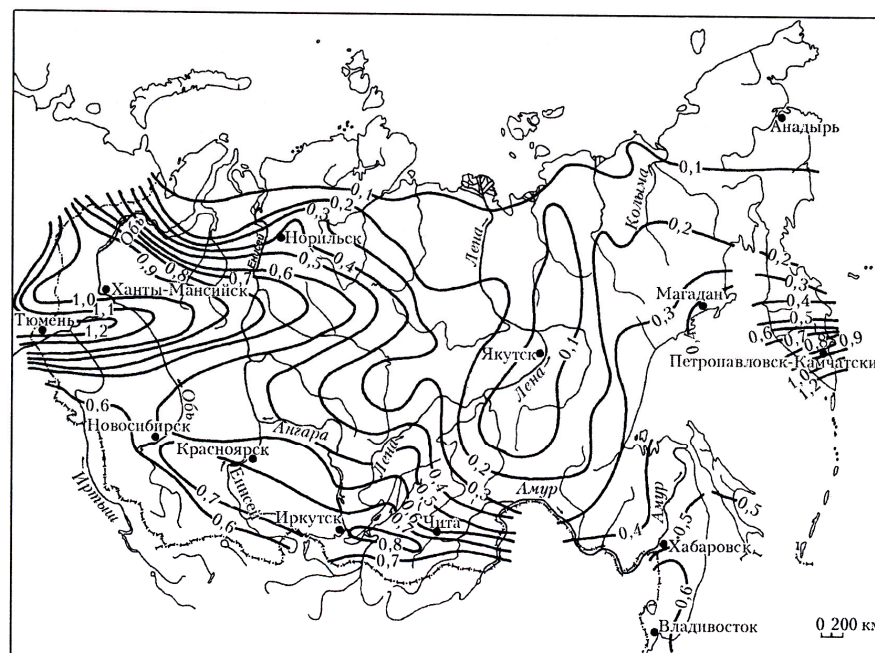


Рис. 2. Атмосферные выпадения кислотных компонентов (As) на территории азиатской части России, кэква⁻¹·год⁻¹

Наибольшие меридиональные и широтные градиенты пространственного распределения величин выпадений характерны для Урала, Западной Сибири и Приморского края. Наибольшие величины выпадений (до $1,30 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) кислотных компонентов также приурочены к территориям Южного и Среднего Урала, южнотаежной зоне Западной Сибири и территории Приморского края. Как и в случае с физиологически активными катионами, наименьшие величины выпадений отмечены в тундровой зоне, подзонах северной и средней тайги в пределах Якутии, Магаданской области и Чукотки. Этим территориям соответствуют наименьшие средние градиенты пространственного распределения величин выпадений.

Отдельно следует отметить тенденцию к снижению величин выпадений подкисляющих соединений на территориях крупных горных систем, таких как Алтай, Западный и Восточный Саян и т.д., которое наблюдается в направлении переноса от периферии к центру. Причиной этого, по-видимому, является то обстоятельство, что воз-

душные потоки, несущие подкисляющие соединения в растворенной и газовой формах, в значительной мере обтекают горные массивы, причем в зонах обтекания интенсивность осаждения газообразных и выпадения растворенных компонентов может возрастать [12].

Современная кислотная нагрузка

Как уже упоминалось выше, согласно международным методикам нами сделана попытка исключить морские соли из баланса кислотности. Цель такого вычленения – показать реальные количества веществ как «подкисляющих», так и противодействующих негативным эффектам подкисления.

Картирование результатов расчетов величин суммарных атмосферных выпадений показало (рис. 3) преобладание на большей части территории выпадений сильных кислотных анионов и аммония над физиологически активными катионами ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$).

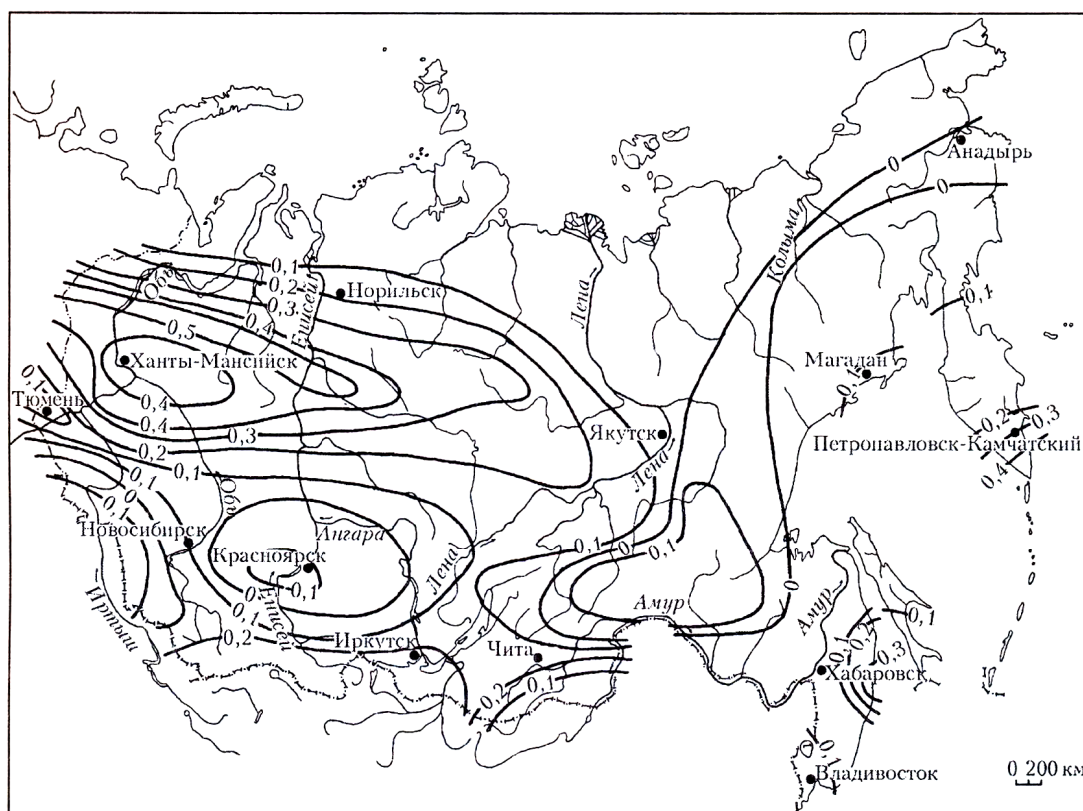


Рис. 3. Современная кислотная нагрузка $\text{As}(\text{pot})$ на территории азиатской части России, $\text{экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$

В пределах тундровой и таежной зон величины современной кислотной нагрузки ($\text{As}(\text{pot})_{\text{вып}}$) составляют $0,1\text{--}0,5 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, причем налицо снижение величин в направлении с юга на север и с запада на восток. Наибольшие величины избытка кислотных компонентов над основными ($0,5 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$) наблюдаются на юге Западной Сибири, далее на север к полярному кругу и на восток к Якутии величины кислотной нагрузки снижаются до $0,1 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Это явление можно объяснить большей плотностью промышленных предприятий на юге азиатской части страны. Кроме того, имеет место перенос подкисляющих соединений – окислов серы и азота – с европейской территории страны. Иначе дело

обстоит в лесостепной зоне и зоне широколиственных лесов, где наблюдается обратная картина – преобладание основных компонентов атмосферных выпадений над кислотными. Величины $\text{As}(\text{pot})_{\text{вып}}$ здесь принимают отрицательные значения – до $-0,5 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$.

Пространственное распределение величин критических нагрузок

Благодаря разнообразию экологических условий Сибири и Дальнего Востока величины критических нагрузок по кислотности варьируют на исследованной территории от 0 до $7 \text{ экв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ (рис. 4).

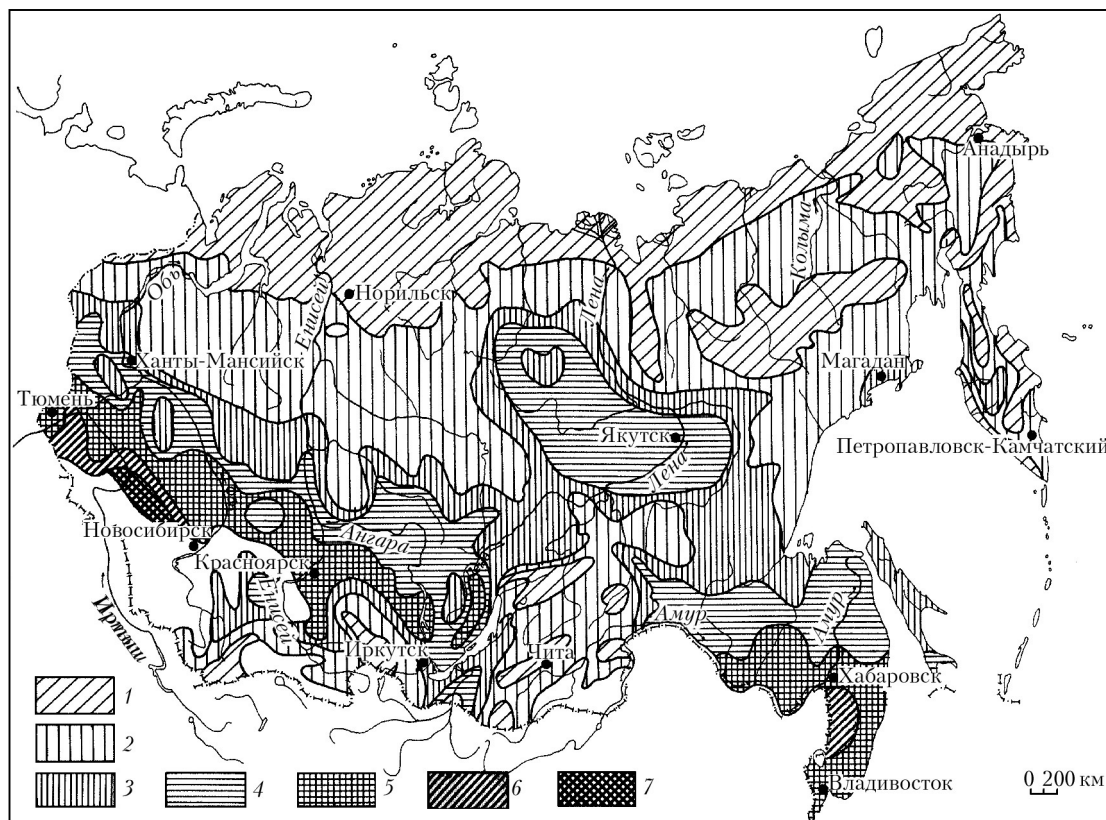


Рис. 4. Критические нагрузки по кислотности CL(As) на экосистемы азиатской части России, $\text{кэkv}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$: 1 – 0–1; 2 – 1–2; 3 – 2–3; 4 – 3–4; 5 – 4–5; 6 – 5–6; 7 – > 6

В целом величины критических нагрузок увеличиваются в направлении с севера на юг и с востока на запад, т.е. в общих чертах пространственное распределение величин критических нагрузок следует за зональным и фациальным распределениями почв и растительности. Приблизительно превышение критических нагрузок по кислотности было оценено по формуле

$$E_x = A_c(\text{pot})^* - \text{CL}(\text{As}), \quad (3)$$

где E_x – превышение.

Для абсолютного большинства экосистем, занимающих более 90% площади тундровой и таежной зон Сибири, получены отрицательные величины превышений, что свидетельствует об отсутствии возможности подкисления и связанных с ним неблагоприятных последствий при современном уровне атмосферных выпадений. Другими словами, допустимая «квота» кислотных выпадений находится в пределах от 0 до 7 $\text{кэkv}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$. Величины $A_c(\text{pot})^*$ и $\text{CL}(\text{As})$ наиболее близки друг к другу в поясах верхней и средней тайги Восточного Саяна и Забайкалья.

1. Nilsson J., Grennfelt P. Critical loads for sulfur and nitrogen: Report from a workshop held at Stokloster, Sweden, 19–24 March, 1988: NORD Miljörapport. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1988. V. 15. 418 p.

M.Yu. Semenov, O.G. Netsvetaeva, N.A. Kobeleva, T.V. Khodzher. The actual and permissible acidity loads on the Asiatic part of Russia.

The actual and permissible acidity loads on the territory of Asiatic part of Russia are evaluated. As the measure of stability, the critical load of acidity was chosen. To show the real amounts of the deposition affecting the acidity balance in soil, sea-salt correction was applied. The main calculated characteristics such as acid and base compounds deposition, total acidity deposition, critical loads of acidity are mapped. It is shown that the critical loads of acidity on the territory of Asiatic part of Russia vary from 0 to 7 $\text{кэkv}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$, while the actual acidity loads are in the range of 0.1 – 0.5 $\text{кэkv}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$. Thus, the excesses of critical loads are not observed all over the territory investigated.

2. Sverdrup H., Warfvinge P. The effect of soil acidification on growth of trees, grass and herbs as expressed by the $(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K})/\text{Al}$ ratio: Report 2. Lund: Department of Chemical Engineering II, Lund University, Sweden, 1993.
3. Warfvinge P., Sverdrup H. Critical Loads of Acidity to Swedish Forest Soils: Methods, Data and Results. Lund, Sweden, 1995. 104 p.
4. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.
5. Экогеохимия городов Восточной Сибири. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. 108 с.
6. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.
7. Обзор нового состояния окружающей среды в 1988 году. М.: Гидрометеоиздат, 1990. 114 с.
8. Охрана окружающей среды в Российской Федерации в 1992 г. / Госкомстат России. М.: Респ. информ.-изд. центр, 1993. 175 с.
9. Черняева Л.Е., Черняев А.М., Могиленских А.К. Химический состав атмосферных выпадений (Урал и Уральский район). Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 177 с.
10. Усватов В.П., Глазовский Н.Ф. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1984. № 1. С. 101–109.
11. Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They Are Exceeded. UN ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution: Texte 71/96. Berlin: Federal Environmental Agency, 1996. 142 p.
12. Кузнецова Л.П. Перенос влаги в атмосфере над территорией СССР. М.: Наука, 1978. 92 с.